



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# **Evolució de la fletxa de la desembocadura del riu Ebre. Implicacions per a la gestió de costes**

Treball realitzat per:

**Carolina Bagés Yàñez**

Dirigit per:

**Manuel García León**

Grau en:

**Enginyeria Civil**

Barcelona, 27 de setembre de 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## RESUM

Un dels principals problemes que sofreix la Badia del Fangar, és el fort transport longitudinal de sediments. Aquest transport longitudinal de sediments ha provocat el desplaçament cap a l'oest de la Punta del Fangar, reduint l'ample del canal entre el mar i la badia. Aquest tancament dificulta la renovació d'aigua, augmentant, així, la probabilitat de períodes d'anòxia i augmentant el risc de mortaldat dels cultius.

L'objectiu d'aquest treball és avaluar una sèrie d'obres toves (dragats i extracció de sorra), per evitar el tancament de la Badia del Fangar. Amb aquesta finalitat, es fa un estudi mitjançant modelat numèric del clima mig d'onatge i la morfodinàmica actual de la zona per a períodes d'hivern i d'estiu. Aquest anàlisi es realitza per als sectors direccionals provinents del nord-est, est nord-est i est, ja que són les direccions d'onatge de major intensitat a la zona. També, s'han considerat tres probabilitats de no excedència, de 0.99, 0.7 i 0.5, les quals defineixen les diferents condicions d'onatge. El resultat d'aquest estudi mostra com el clima d'onatge provinent del est nord-est, amb una probabilitat de 0.99 i pertanyent al període d'hivern, és el que genera les majors corrents transversals i longitudinals i un major transport de sediments.

En aquesta tesi s'ha proposat construir una rasa en la Punta del Fangar, amb la finalitat d'evitar que el transport longitudinal tanqui la badia. A més d'aquesta finalitat, la construcció d'una rasa pot suposar un altre benefici. Aquest benefici és que el material extret pot servir per a fer alimentacions a parts del Delta de l'Ebre on hi ha dèficit. Les rases proposades són: Rasa 1, situada a la part emergida de la zona oest del domini, la Rasa 2, localitzada a la part emergida de la zona central-est, i la Rasa 1+2, la qual és una combinació d'ambdues rases, 1 i 2, a la vegada. L'estudi de les rases mostra com la Rasa 1 genera una major reducció de les corrents transversals i del transport de sediments, mentre que per a la Rasa 2 s'obté una major reducció de les corrents longitudinals i per a la Rasa 1+2 els resultats mostren que genera molt poc impacte en la zona. Finalment es conclou que la Rasa 1 provoca un major impacte per evitar el tancament de la badia, ja que genera una reducció d'un 30% de les corrents longitudinals i una baixada en l'erosió i acumulació de sediments de 15 cm i 10 cm, respectivament.

**Paraules clau:** Punta del Fangar, hidrodinàmica, morfodinàmica, rasa, corrents longitudinals, corrents transversals, transport de sediments

## ABSTRACT

One of the main problems that the Fangar bay suffers is the strong longitudinal transport of sediments. This longitudinal transport of sediments has caused the displacement to the west of the Punta del Fangar, reducing the channel width between the bay and the sea. The closure hinders the renewal of water, thus increasing the probability of anoxia periods and the risk of crops mortality.

The aim of this work is evaluate a series of soft works (dredget and sand extraction). For this purpose, a study is done through numerical modelling of the wave climate and morphodynamics of the area is done for winter and summer periods. This analysis is carried out for the northeast, east northeast and east directional sectors, as they are the wave directions of greater intensity in the area. In addition, three probabilities of occurrence of 0.99, 0.7 and 0.5 have been considered, which defines the different wave conditions. The results of this study shows how the wave climate coming from the east northeast, with a probability of 0.99 and pertaining to the winter period, is the one that generates the largest transversal and longitudinal currents and the greater sediment transport.

In this thesis the construction of a trench in the Punta del Fangar has been proposed, for the purpose of avoid the closure of the bay because of the longitudinal transport of sediments. In addition to this purpose, the construction of a trench can suppose another benefit. This benefit is that the extracted material could be used for feeding parts of the Ebro Delta where there is a deficit. The proposed trenches are: Trench 1, located in the emerged part of the west area of the domain, Trench 2, located also in the emerged part but in the central-east area of the domain, and Trench 1+2, which is the combination of both trenches, 1 and 2, at the same time. The study of the trenches shows how the Trench 1 generates the largest reduction of the transversal currents and sediment transport, for Trench 2 is obtained the greater reduction of the longitudinal currents and for the Trench 1+2 the results shows that it generates very little impact in the area. Finally, is concluded that the Trench 1 causes a greater impact to avoid the bay closure as it generates the lowest sediment transport, as it generates a 30% reduction of the longitudinal currents and a drop in the erosion and accumulation of sediments of 15 cm and 10 cm, respectively.

**Key words:** Punta del Fangar, hydrodynamics, morphodynamics, trench, longitudinal currents, transversal currents, sediment transport

## TAULA DE CONTINGUTS

RESUM.....	I
ABSTRACT .....	II
LLISTAT DE FIGURES .....	V
LLISTAT DE TAULES.....	VIII
1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS .....	1
1.1. Introducció .....	1
1.2. Objectius .....	1
2. ESTAT DE L'ART .....	2
3. ÀREA D'ESTUDI.....	3
4. METODOLOGIA.....	10
4.1. Estudi dels diferents escenaris.....	10
4.2. Model d'onatge .....	11
4.2.1. Teoria lineal de l'onatge.....	11
4.2.2. Equacions de conservació .....	11
4.2.3. Propagació.....	14
4.3. Model XBeach .....	15
4.3.1. Model hidrodinàmic .....	15
4.3.2. Ones curtes.....	15
4.3.3. Ones llargues.....	18
4.3.4. Transport de sediments .....	19
4.3.5. Re configuració del fons.....	23
4.4. Descripció dels diferents escenaris .....	23
4.4.1. Sense rasa.....	24
4.4.2. Rasa 1 .....	24
4.4.3. Rasa 2 .....	24
4.4.4. Rasa 1+2 .....	24
5. RESULTATS.....	26
5.1. Anàlisi hidrodinàmic.....	26
5.1.1. Recopilació de resultats: Anàlisi hidrodinàmic .....	27
5.2. Anàlisi morfodinàmic .....	33
5.2.1. Recopilació de resultats: Anàlisi morfodinàmic .....	33
6. DISCUSSIÓ .....	53
6.1. Anàlisi hidrodinàmic .....	53
6.1.1. Distribució de l'alçada d'ona (SL=0) .....	53

6.1.2.	Distribució de la direcció d'ona ( $SL=0$ ) .....	54
6.2.	Anàlisi morfodinàmic .....	54
6.2.1.	Hidrodinàmica .....	54
6.2.2.	Morfodinàmica .....	55
7.	CONCLUSIONS .....	59
8.	BIBLIOGRÀFIA .....	60

## LLISTAT DE FIGURES

<b>Figura 1.</b> Delta de l'Ebre. Font: (www.maps.google.com) .....	3
<b>Figura 2.</b> Rosa dels vents en els mesos d'hivern i d'estiu (2004-2017). Font: Puertos de Estado	5
<b>Figura 3.</b> Projecció regional en l'augment del nivell del mar al 2100 en la Costa Catalana (Sánchez-Arcilla et al., 2016).....	7
<b>Figura 4.</b> Punta del Fangar (www.maps.google.com) .....	8
<b>Figura 5.</b> Línies de costa actuals i dels diferents escenaris de canvi climàtic en la Península del Fangar i la platja de Marquesa (foto extreta de "Estudio de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña").....	9
<b>Figura 6.</b> Localització de les rases .....	24
<b>Figura 7.</b> Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de $H_s$ i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	27
<b>Figura 8.</b> Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de $H_s$ i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	28
<b>Figura 9.</b> Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de $H_s$ i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	29
<b>Figura 10.</b> Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de $H_s$ i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	30
<b>Figura 11.</b> Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de $H_s$ i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	31
<b>Figura 12.</b> Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de $H_s$ i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	32
<b>Figura 13.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.....	34
<b>Figura 14.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est	

nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	35
<b>Figura 15.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est amb probabilitats $P=0.99$ , $0.7$ i $0.5$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	36
<b>Figura 16.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (a dalt) i transversal (a baix), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del nord-est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	38
<b>Figura 17.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (a dalt) i transversal (a baix), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est nord-est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	39
<b>Figura 18.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (a dalt) i transversal (a baix), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	40
<b>Figura 19.</b> Variació espacial del transport de sediments, al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	42
<b>Figura 20.</b> Variació espacial del transport de sediments, al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	43
<b>Figura 21.</b> Variació espacial del transport de sediments, al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	44
<b>Figura 22.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (fila de dalt) i transversal (segona fila), i del transport de sediments (última fila), al final de la simulació ( $t=12h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de les corrents longitudinals i transversals, del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	46
<b>Figura 23.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (fila de dalt) i transversal (segona fila), i del transport de sediments (última fila), al final de la simulació ( $t=18h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del $0.99$ per a la Punta del Fangar. La magnitud de les corrents longitudinals i transversals, del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	47

<b>Figura 24.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (fila de dalt) i transversal (segona fila), i del transport de sediments (última fila), al final de la simulació ( $t=12h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de les corrents longitudinals i transversals, del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	48
<b>Figura 25.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , 0.7 i 0.5 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	50
<b>Figura 26.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats $P=0.99$ , 0.7 i 0.5 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	51
<b>Figura 27.</b> Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est amb probabilitats $P=0.99$ , 0.7 i 0.5 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinúes són línies batimètriques.....	52



## LLISTAT DE TAULES

<b>Taula 1.</b> Alçada d'ona significant i període de pic (Desembre-Febrer) .....	10
<b>Taula 2.</b> Alçada d'ona significant i període de pic (Juny-Agost).....	11
<b>Taula 3.</b> Diferència del mòdul de corrents longitudinals i d'erosió de una tempesta de 12 h respecte una tempesta de 6h. ....	56
<b>Taula 4.</b> Diferència del mòdul de corrents longitudinals i d'erosió de una tempesta de 18 h respecte una tempesta de 6h. ....	56
<b>Taula 5.</b> Diferència del mòdul de corrents longitudinals i d'erosió de una tempesta de 24 h respecte una tempesta de 6h. ....	57
<b>Taula 6.</b> Resum dels resultats principals.....	58

# 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS

## 1.1. Introducció

El Delta de l'Ebre, situat a la província de Tarragona, és un sistema dinàmic que sofreix canvis constantment. Aquestes transformacions són causades per diferents agents que caracteritzen la zona com el transport de sediments, el patró de corrents, l'onatge, els sectors direccionals, etc.

La Punta del Fangar, situada al nord-oest de la desembocadura del Delta de l'Ebre, és una gran extensió de formació força moderna (segle XVII a XIX). Es tracta d'una península que s'endinsa a la mar al nord del delta, davant de la Badia del Fangar.

La Badia del Fangar, juntament amb la Badia dels Alfacs, és un dels dos centres principals de cultiu aquícola del Delta de l'Ebre. A la badia hi ha una important aportació d'aigua dolça provinent dels arrossars. Aquest abocament d'aigua dolça, la qual aporta nutrients inorgànics i matèria orgànica, juntament amb l'entrada d'aigua marina, que entra per la seva connexió al mar, fan de la badia un estuari amb les condicions adients per a la cria de musclos. La producció de musclos és l'activitat que genera més benefici econòmic.

Un dels principals problemes que pateix la Badia del Fangar, és la forta erosió de les dunes que té lloc al Fangar per efecte de l'erosió litoral. Aquesta erosió provoca una notable pèrdua de la zona marítima-terrestre a la zona de Marquesa. Així doncs, els sediments erosionats són transportats per les corrents fins la Punta del Fangar, produint el tancament de la Badia del Fangar, ja que aquesta es desplaça cap a l'oest. El tancament de la badia comportaria un al risc per a la conservació de la diversitat biològica que alberga la badia.

Aquest treball proposa un sistema de rases per evitar el tancament de la badia. Per poder realitzar l'estudi primer s'analitzarà la hidrodinàmica i la morfodinàmica de la zona d'estudi.

Una vegada s'hagi analitzat el domini d'interès, s'estudiaran les diferents rases de diferents volums i situades en diferents punts d'interès. Seguidament, es realitzarà un estudi de la hidrodinàmica i morfodinàmica de la zona amb les diferents alternatives, per veure quina rasa tindrà un major impacte per evitar el tancament de la Badia del Fangar.

## 1.2. Objectius

L'objectiu principal del treball serà analitzar els patrons hidrodinàmics i morfodinàmics de la Punta del Fangar, amb l'escenari actual i tres escenaris de rases diferents, amb dades obtingudes de la boia de Tarragona proporcionades per Puertos del Estado, que trobem a la Taula 1 i a la Taula 2. Amb aquestes dades, s'espera poder proposar una alternativa per evitar el tancament de la badia i que minimitzi el cost de l'obra i l'impacte mediambiental.

## 2. ESTAT DE L'ART

El Delta de l'Ebre desemboca al Mediterrani i està situat a la província de Tarragona, a les comarques del Baix Ebre i Montsià. És un dels deltes més extensos del Mediterrani, amb una superfície aproximadament de 320 km<sup>2</sup>. La plana deltaica és una de les àrees més vulnerables als efectes del escalfament global a Catalunya.

Al juny de 1983, la Generalitat de Catalunya va crear el Parc Natural del Delta de l'Ebre amb la finalitat de protegir els espais naturals de la profunda humanització que sofria aleshores. Aquest parc es va crear a partir d'un decret que inicialment només protegia els espais naturals del marge esquerra del riu, més tard es va formular una extensió perquè també protegís la banda dreta del riu. Amb aquest decret es fa constància del Delta de l'Ebre com a primera zona humida de Catalunya.

Per a la conservació i ús racional de les zones humides, al 1975 es va posar en vigor el tractat intergovernamental de la Llista de Zones Humides de Importància Internacional, en el qual el Delta de l'Ebre hi forma part. Les zones humides configuren un ecosistema amb una gran biodiversitat.

Al 2008, per encàrrec de l'Oficina Catalana del Canvi Climàtic, del Departament de Medi Ambient i Habitatge, l'empresa Taller d'Enginyeria Ambiental, SL va publicar *l'Estudi de base per a l'estratègia de prevenció i adaptació al canvi climàtic en Catalunya* el qual se centrava en el Delta de l'Ebre. Aquest estudi realitza una avaluació de la vulnerabilitat del Delta de l'Ebre al canvi climàtic, juntament amb una prognosi de l'evolució de la línia de costa.

### 3. ÀREA D'ESTUDI

El Delta de l'Ebre està situat al Mar Mediterrani, a la província de Tarragona i és considerat un dels deltes més llargs del Mediterrani, amb una extensió de 320 km<sup>2</sup> d'àrea emergida. El riu travessa el delta pel mig i desemboca al mar en dos braços anomenats les Goles de l'Ebre que envolten l'Illa de Buda. El Delta de l'Ebre forma dues barreres que clouen dues badies, la badia del Fangar situada al nord i la badia dels Alfacs al sud. La segona badia està closa per la Barra del Trabucador la qual mesura 6km de llarg i 250 metres d'amplada.

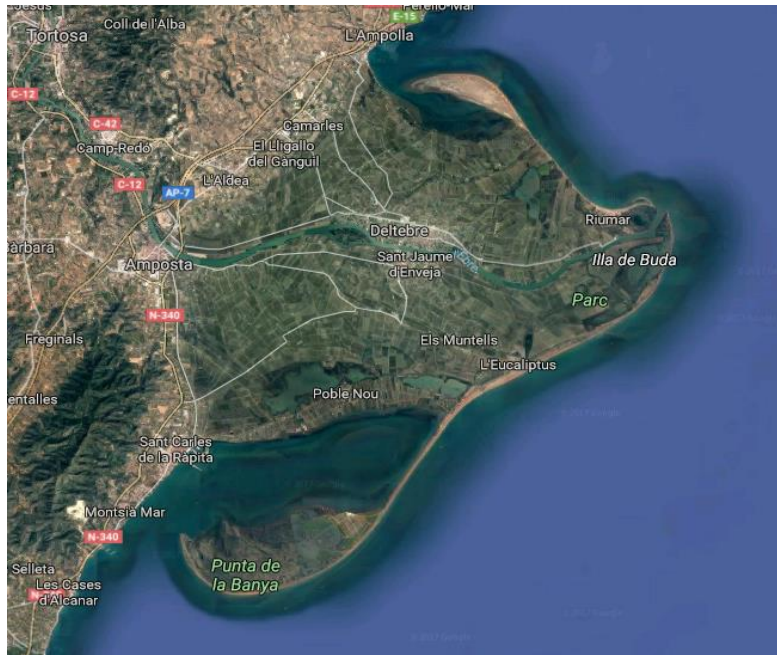


Figura 1. Delta de l'Ebre. Font: (www.maps.google.com)

batimetria juga un paper important en les propietats hidrodinàmiques de les costes, a causa de la seva gran influència en el trencament de les ones i en els patrons de circulació costaners.

El Delta de l'Ebre es va originar a partir d'un excés de cabal sòlid causat per una desforestació massiva. Aquesta plana al·luvial creada per la deposició de sediments es projecta prop de 22 km mar endins. (Jiménez J.A., 1996), fins als anys 1966-1969, la morfologia del delta de l'Ebre estava molt influenciada pel swell i pel cabal sòlid. Actualment, la morfologia i el desenvolupament del delta estan dominats en gran part per l'acció de les onades. Això es deu a la gran reducció de cabal sòlid causada per la construcció de preses al llarg del riu, fet que ha produït una erosió continua del delta i un condicionament en el desenvolupament actual del front deltaic. Durant el segle XX, al voltant d'unes 200 preses van ser construïdes al llarg de l'Ebre, retenint el 99,9% dels sediments del riu (Departament de Territori i Sostenibilitat, 2009).

Les preses construïdes al llarg del riu Ebre, a banda de produir una reducció del cabal sòlid, també produeixen una gran reducció en el cabal líquid del riu que arriba a la desembocadura. La disminució del cabal líquid provoca que l'aigua salada penetri per sota de l'aigua dolça, generant un increment de salinitat en l'aigua. Aquest augment de la salinitat provoca dificultats en les activitats agrícoles del delta, p.e. els camps d'arròs, els quals ocupen una gran extensió del delta, són molt vulnerables a l'augment del nivell del mar i com a conseqüència a l'increment de salinitat en els sòls (Genua-Olmedo et al., 2016).

Com que la plana deltaica no supera el 4-5 metres d'altitud del nivell del mar, el Delta de l'Ebre es veu molt afectat per l'increment del nivell del mar causat pel canvi climàtic (Sánchez-Arcilla et al., 2016). La mida mitjana del sediment en la línia de costa ronda els 250 µm, presentant variacions al llarg de la costa que depenen de l'energia de l'onatge incident, i per tant, de la intensitat de transport de sediment (Guillén i Jiménez et al., 1995).

Per tant, segons (Jiménez et al., 1997), els factors principals que controlen la re-configuració del Delta de l'Ebre són les onades (escala a curt termini) i les variacions del nivell mig del mar (llarg termini).

A partir de diversos estudis oceanogràfics de la zona, segons (Fernández-Nóvoa et al., 2015), la interacció de la ploma del riu amb la circulació general mostra un desplaçament cap el sud de la ploma, fins i tot amb absència de vent (més del 70% del plomall està situat al sud de la desembocadura del riu amb qualsevol condició de vent).

### *Clima de vent*

El clima en el Delta de l'Ebre es caracteritza per humitats elevades i temperatures moderades (Bolaños et al., 2009). El vent és un factor característic d'aquesta zona, això és atès que la part final del riu discorre entre dues valls. El vent més freqüent és el provinent del nord i nord-oest (Cautera et al., 2004).

La topografia del Delta de l'Ebre, igual que en la Costa Catalana, es caracteritza per un clima de micro-marees. Els rangs màxims de les marees astronòmiques és de 0,25 m, amb un valor mig de 0,16 m (Cacchione et al., 1990). En canvi durant el mesos de setembre a novembre, les marees meteorològiques arriben al seu màxim. La mitjana anual de l'alçada d'ona significant en aigües profundes en l'àrea volta els 0.7 metres, amb un període mig de l'ordre de 4 segons (Sánchez-Arcilla et al., 1997).

Per analitzar el clima de vent es fa servir la xarxa XIOM (Xarxa d'Instruments Oceanogràfics i Meteorològics). En el Delta de l'Ebre, per al clima de vent, s'usaven 4 estacions meteorològiques i una bolla direccional d'onatge situada al Cap de Tortosa. Les estacions meteorològiques estaven situades a l'Ampolla, Deltebre, Sant Carles de la Ràpita i Casablanca. Aquestes estacions proporcionen les dades relacionades amb la velocitat mitjana, màxima i direcció dominant del vent. En canvi, la boia direccional d'onatge proporciona informació de l'alçada, període i direcció de l'onatge.

Segons (García et al., 1993) les onades incidents en el Delta de l'Ebre venen bàsicament de tres direccions: est nord-est, sud i nord-oest. Els vents provinents del nord-oest provoquen tempestes limitades pel fetch. En canvi, els vents de l'est, del nord-est i sud, són responsables de tempestes amb més fetch, més energètiques i produeix el transport de sediments més significatiu cap a la direcció del delta. A més, les tempestes produïdes pels vent de l'est i del nord-est són els responsables de l'entrada d'aigua a les llacunes.

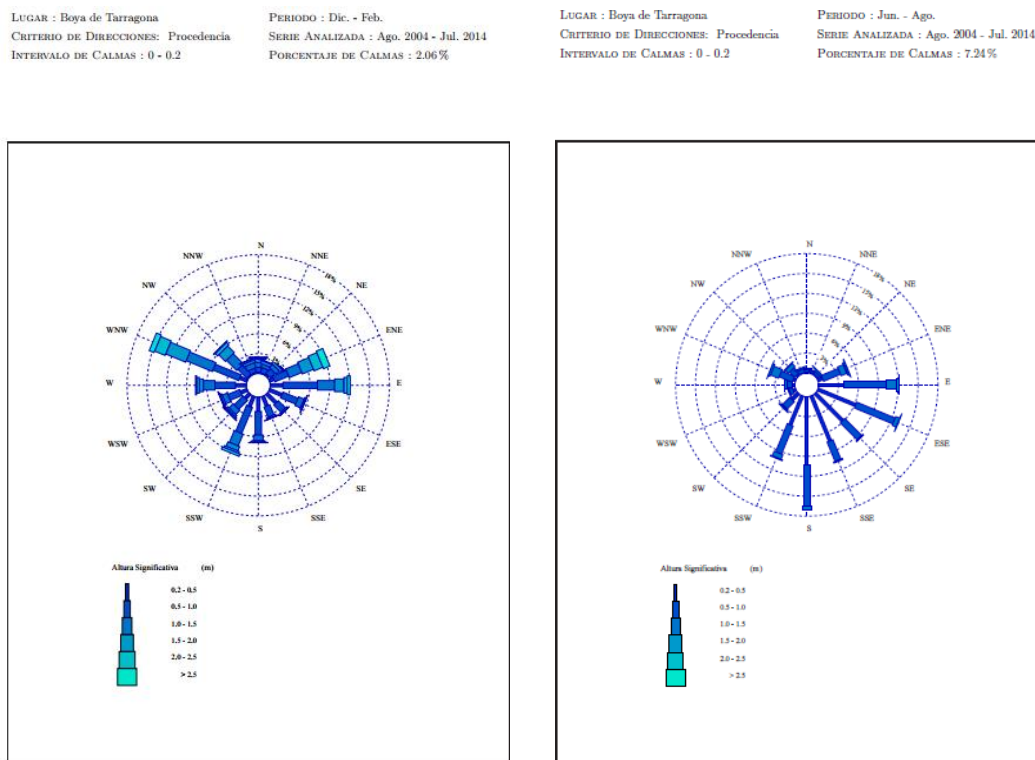


Figura 2. Rosa dels vents en els mesos d'hivern i d'estiu (2004-2017). Font: Puertos de Estado

### Temporals marins

Hi ha dues condicions atmosfèriques principals que condueixen els temporals marins en la costa Catalana: altes pressions en les àrees al voltant del Regne Unit i esdeveniments ciclogènics que resulten en àrees de baixa pressió al nord-oest del Mediterrani (Cateura et al., 2004).

Per a diferenciar episodis de temporals marins s'analitza el comportament del vent en les diferents estacions de l'any respecte l'onatge. Les màximes velocitats (en promig horari) registrades es comprenen entre els 20.7 m/s en els mesos de febrer, març i setembre, de

direccions del nord-oest, est i oest, respectivament, fins els 28,1 m/s del nord-oest en desembre. (Cateura et al., 2004).

Depenent de l'estació meteorològica, hi ha una millor correspondència entre l'onatge i la direcció del vent. En les estacions meteorològiques de l'Ampolla i Sant Carles de la Ràpita, l'estació detecta millor l'onatge quan la direcció del vent és del nord-oest. En canvi, l'estació de Casablanca detecta millor els temporals del llevant.

El Delta de l'Ebre és una zona on aproximadament el 50% de les tempestes es caracteritzen per tenir un espectre bimodal d'ona, mentre que a la resta de la costa catalana només s'hi presenten alguns casos (Bolaños et al., 2009).

### *Erosió*

Després d'anys de progradació del Delta de l'Ebre, aquest ha adoptat una tendència de desenvolupament regressiva degut a l'acció de les onades (Rodríguez et al., 2004). La regressió de la línia costanera es deu a que, quan les onades erosionen les platges, les corrents de retorn mobilitzen el sediment mar endins dificultant, així, la seva reentrada en el perfil actiu.

Una de les principals causes d'erosió del Delta de l'Ebre és aquest caràcter regressiu. Com que el sediment és molt fi, les onades s'emporten els sediments amb facilitat i a causa de la disminució de sediments per la construcció de preses aquest no pot ser reemplaçat. Dit d'una altra manera, la regressió d'una zona sorgeix quan el volum de sediment eliminat és major que el volum de sediment descarregat a la zona. A l'any 2009, la taxa de subsidència mitja en el Delta de l'Ebre al llarg del quaternari ha estat valorada en uns 0,09-0,3 mm/any (Generalitat de Catalunya, 2009).

En aquesta situació, el contorn deltaic va prenent progressivament un nou perfil d'equilibri, regit principalment per les condicions d'onatge. Considerant globalment tot el delta, no es produeix una pèrdua de la superfície total emergida, sinó una redistribució dels sediments litorals (Generalitat de Catalunya, 2009). Per això es poden trobar àrees regressives, que són compensades per un creixement en altres zones.

### *Augment del nivell del mar*

El canvi climàtic i l'augment del nivell del mar (SLR) són impactes mundials que amenacen la sostenibilitat dels territoris costaners i valuosos ecosistemes com els deltes (Genua-Olmedo et al., 2016).

Segons (Aguilar et al., 2012), el delta té una alta sensibilitat als canvis en el nivell del mar, i va proposar que entre el 45-60% de les àrees es veurien afectades considerant escenaris baixos i alts de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

El canvi climàtic és un dels principals responsables de l'augment del nivell del mar. En la Figura 3 es pot veure l'augment del nivell del mar al llarg dels anys en diferents RCP (Representative Concentration Pathways). Els valors de SLR (Sea Level Rise) projectats a partir del 2005, prenen com a base el nivell mitjà del mar a l'any 1992.

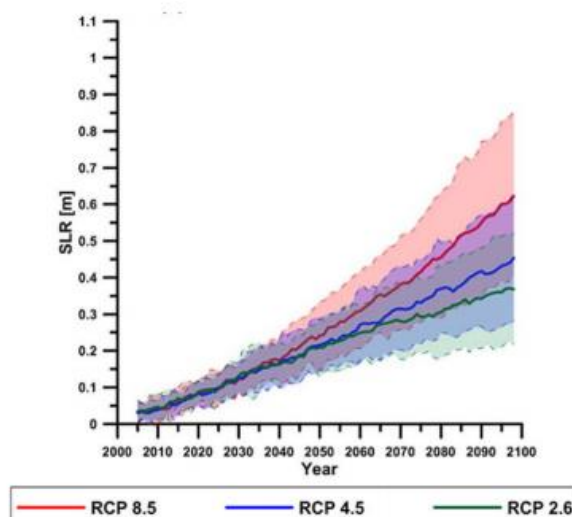


Figura 3: Projecció regional en l'augment del nivell del mar al 2100 en la Costa Catalana (Sánchez-Arcilla et al., 2016)

Com es pot observar en la Figura 3, l'interval de confiança del 90% presenta valors de SLR propers a 0,85 m, 0,6 m i 0,5 m per als RCP 8.5, 4.5 i 2.6, respectivament. El valor mig de SLR de l'interval de confiança per als RCP 8.5, 4.5 i 2.6 és aproximadament de 0,65 m, 0,45 m i 0,3 m, respectivament.

D'altra banda, també es pot percebre com en la primera meitat de segle, tots els escenaris tenen un SLR similar. D'altra banda, es veu com a partir de la segona meitat del segle, la tendència dels diferents valors de RCP comencen a divergir. Aquesta divergència es deguda a que a partir de l'any 2050 els models es basen en escenaris socioeconòmics diferents, incrementant així la incertesa.

#### *Punt de vista socio-econòmic*

Les principals activitats econòmiques en el Delta de l'Ebre són: l'agricultura, la pesca, l'aqüicultura i el turisme. L'agricultura representa el 50% de l'economia total de la regió, seguida del turisme (25%), pesca i aquicultura (Slootweg et al., 2008). Dins les activitats agrícoles, s'ha d'emfatitzar el cultiu d'arròs. El cultiu d'arròs en el Delta de l'Ebre representa el 98% de la producció total a Catalunya i és el tercer més important d'Europa, això es degut a la gran extensió que ocupen aquests terrenys (aprox. 60% de la plana deltaica) (Garriga et al., 2010).

D'altra banda, hi ha una altra indústria rellevant en aquesta àrees, i és l'extracció de sal que es duu a terme en les Salines de la Trinitat. A més a més, l'aqüicultura cada vegada va més en augment degut a la cria de musclos i a que algunes localitats del Delta de l'Ebre són un dels llocs més coneguts on es poden caçar anguiles.



### Punta del Fangar

La Punta del Fangar és una península que s'endinsa mar endins, al nord-oest de la desembocadura de l'Ebre, dins el municipi de Deltebre. Les seves dimensions es poden resumir en de 6 km de llargada i 3 km d'ample.

El creixement d'aquesta fletxa litoral ha format un cos d'aigua semi clos, anomenat Badia del Fangar. Aquest sistema semi clos rep aportacions d'aigua dolça provinents de la plana deltaica, les quals creen un estuari amb unes condicions adients per a la cria de musclos. L'entrada més important d'aigua marina a la badia es realitza a través de la bocana, la qual té una amplada de 1 km aproximadament, tot i que cal mencionar que els forts temporals de llevant poden provocar una notable entrada d'aigua salada al sobre passar la fletxa litoral.

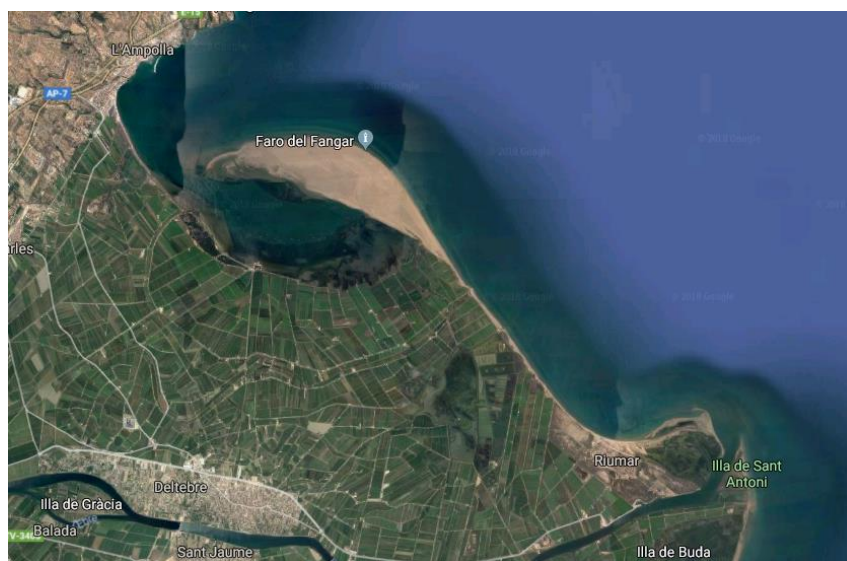


Figura 4. Punta del Fangar ([www.maps.google.com](http://www.maps.google.com))

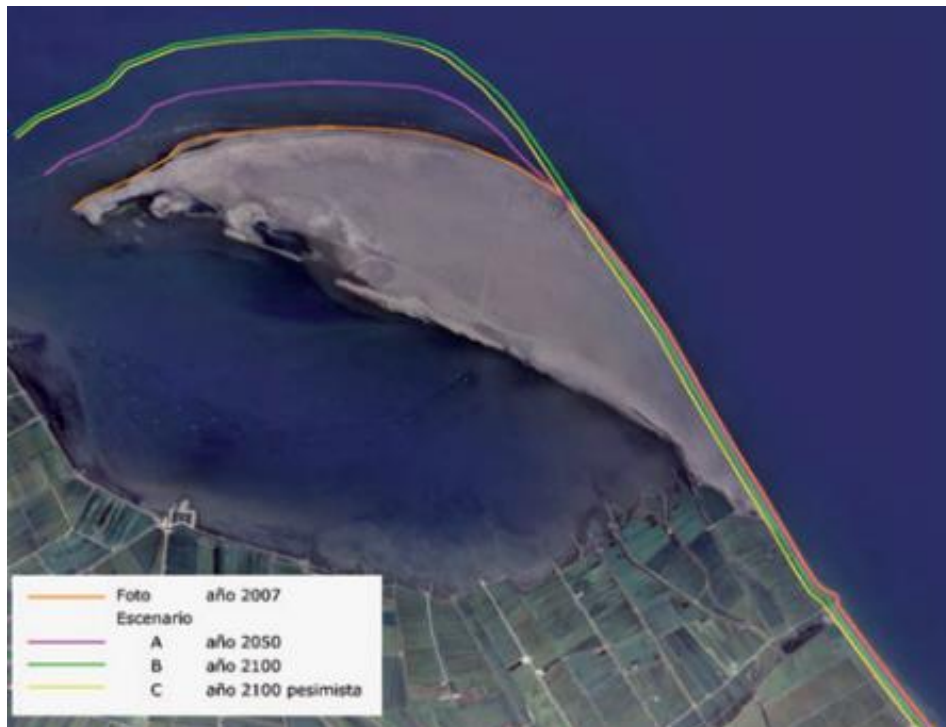
A més de la cria de musclos, la península també és de gran importància des del punt de vista de la fauna, ja que té un gran paper en la cria d'ocells marins i dels cultius. Els canals de desguàs de la plana deltaica constitueixen un model de regadiu molt dinàmic pels cultius.

La Punta del Fangar és un clar exemple de la redistribució dels sediments del Delta de l'Ebre, ja que al Fangar es veu clarament la regressió del Cap de Tortosa, la qual es compensada en l'àrea de la Punta del Fangar.

### Predicció futura del Fangar

En l'estudi realitzat per la Generalitat, anomenat "*Estudio de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña*", es mostra el retrocés de la Península del Fangar en diferents escenaris de canvi climàtic. En aquest estudi s'ha calculat el retrocés de la Península del Fangar per a diversos nivells de l'augment del mar i en diferents horitzons temporals.

En l'escenari A es considera un augment del nivell del mar de 15 cm a l'any horitzó 2050, sent el retrocés mig calculat de 8,9 metres. En l'escenari B s'ha considerat un augment de 40 cm en l'any horitzó 2100, el retrocés estimat ha estat de 23,72 metres. I en l'escenari C, considerant l'any 2100 com a horitzó temporal i un augment del nivell del mar de 100 cm, es preveu un retrocés de 59,31 metres.



*Figura 5. Línies de costa actuals i dels diferents escenaris de canvi climàtic en la Península del Fangar i la platja de Marquesa (foto extreta de "Estudio de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña")*

La Figura 5, mostra els diferents escenaris considerats. Tal i com es pot observar la Punta del Fangar experimentarà un retrocés que, poc a poc, anirà tancant la obertura de la badia. Aquest tancament de la badia pot suposar un problema en la cria de musclos i en les diferents espècies que formen part de l'ecosistema de la badia del Fangar.

## 4. METODOLOGIA

Per analitzar el problema tal que es pugui trobar la solució que més s'adapti a la situació, el primer que es farà serà seleccionar diverses direccions d'ona en funció de l'orientació de la Punta del Fangar. Per a seleccionar les diferents direccions d'ona, s'ha considerat la intensitat a cada direcció a partir de registres històrics. Les tres direccions amb més freqüència són: nord-est, est nord-est i est.

El segon pas és definir els diferents escenaris de tempesta per a diferents probabilitats. Les probabilitats en les que es defineixen les diferents condicions d'ona són: 0.9, 0.7 i 0.5.

Una vegada seleccionades les direccions i les diferents probabilitats en que es vol fer l'anàlisi, es defineixen les característiques de l'onatge durant els mesos de desembre a febrer (hivern), i durant els mesos de juny a agost (estiu).

Per a cada situació definida a la Taula 1 i Taula 2, les condicions d'ona es propaguen des d'aigües profundes a aigües someres mitjançant el programa SWAN.

### 4.1. Estudi dels diferents escenaris

En primer lloc s'ha realitzat un anàlisi hidrodinàmic del Delta del Ebre, per tal de poder entendre millor la propagació de l'onatge. L'anàlisi s'ha fet per les diferents direccions i probabilitats esmentades anteriorment, considerant que l'augment del nivell del mar és zero. En la Taula 1 i Taula 2 es mostra, per a diferents estacions de l'any, el període de pic i l'alçada d'ona corresponents a les diferents probabilitats i direccions d'ona.

Probabilitat de no excedència	DIRECCIÓ					
	NE (45°)		ENE (67,5°)		E (90°)	
	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)
<b>0.99</b>	2,8	7	3,8	10	3,1	8
<b>0.7</b>	1,35	5	1,85	6	1,25	5
<b>0.5</b>	1,05	5	1,35	5	0,95	5

Taula 1. Alçada d'ona significant i període de pic (Desembre-Febrer)

Probabilitat de no excedència	DIRECCIÓ					
	NE (45°)		ENE (67,5°)		E (90°)	
	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)	Hs (m)	T <sub>P</sub> (s)
<b>0.99</b>	1,75	6	2,4	7	1,85	6
<b>0.7</b>	1	5	1	5	0,85	5

0.5	0,85	5	0,8	5	0,65	5
-----	------	---	-----	---	------	---

Taula 2. Alçada d'ona significant i període de pic (Juny-Agost)

En a la direcció est nord-est i amb una probabilitat del 0.99, s'ha detectat els valors d'alçada d'ona significant més elevats. El valor de l'alçada d'ona significant per als mesos de desembre a febrer i de juny a agost és de 3,8 m i 2,4 m, respectivament.

## 4.2. Model d'onatge

Per a la modelització de l'onatge s'ha usat el model SWAN (Simulating WAVes Nearshore). El programa SWAN és una eina per al càlcul de propagacions d'onatge que inclou els processos de generació d'onatge, refracció, propagació espacial dissipació i interacció no lineal entre ones. Aquest model pertany a la tercera generació de models d'ona i es basa en un esquema numèric implícit de propagació, el qual és sempre numèricament estable.

### 4.2.1. Teoria lineal de l'onatge

La teoria lineal permet descriure en detall les ones harmòniques, la suma de les quals permet caracteritzar un escenari d'ones aleatori. Les ones harmòniques tenen un caràcter lineal, això implica que aquestes ones no s'afecten entre elles mentre viatgen juntes per la superfície lliure.

Per a poder aplicar la teoria lineal, cal considerar una sèrie de condicions:

- Fluid homogeni i incompressible ( $\rho=\text{constant}$ )
- Tensió superficial menyspreable.
- Efecte de Coriolis menyspreable.
- Pressió a la superfície lliure uniforme i constant.
- Fluid ideal.
- Flux irrotacional.

La teoria lineal es basa en dues equacions fonamentals: l'equació de conservació de la massa i l'equació de conservació de la quantitat de moviment.

### 4.2.2. Equacions de conservació

L'equació de la *conservació de la massa per unitat de volum* és:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho u_z}{\partial z} = S_\rho \quad (1)$$

El primer terme de l'esquerra és la taxa local de variació de la densitat. Els tres següents representen l'efecte del transport (termes advection). Per últim, el terme que està a la dreta de l'equació és la generació o dissipació de la densitat per unitat de volum i per unitat de temps.

Considerant que la densitat local és constant i que no hi ha producció d'aigua, resulta l'equació de la continuïtat:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Tal i com es pot observar en l'Equació (2), l'equació és lineal en termes de la velocitat de les partícules d'aigua  $u_x$ ,  $u_y$  i  $u_z$ . Mitjançant l'equació de la conservació de la massa s'arriba a la equació de la continuïtat aplicant les hipòtesis mencionades anteriorment de la teoria lineal.

D'altra banda, per obtenir l'equació de conservació del moment, hem de considerar la quantitat de moviment per unitat de volum de les partícules d'aigua, la qual és el producte de la densitat per la velocitat de les partícules d'aigua:

$$\rho \vec{u} = \{\rho u_x; \rho u_y; \rho u_z\} \quad (3)$$

L'equació de conservació de la quantitat de moviment per unitat de volum en la component x, resulta:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \frac{\partial u_x(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial u_y(\rho u_x)}{\partial y} + \frac{\partial u_z(\rho u_x)}{\partial z} = F_x^m \quad (4)$$

On  $F_x^m$  és la taxa de canvi de la quantitat de moviment en l'eix x ( $dP/dt = d(mv)/dt = m \cdot a = F$ ). Es necessari linealitzar l'Equació (4), ja que les velocitats estan al quadrat. Per poder aplicar la teoria lineal una condició necessària és que tots els termes siguin lineal. Per tant, una vegada linealitzada l'Equació (4) i considerant que la força  $F_x^m$  és producte del gradient de pressions, s'obté l'equació de conservació de la quantitat de moviment linealitzada:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \end{aligned} \quad (5)$$

Per a trobar una solució analítica per a les equacions de conservació s'empra la funció potencial de la velocitat, on les derivades espacials són iguals a la velocitat de les partícules d'aigua:

$$\phi(x, y, z, t) = \left( \frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = (u_x, u_y, u_z) \quad (6)$$

L'Equació (6), és una eina que serveix per simplificar la solució analítica de les equacions de conservació. És a dir, és una funció que no té un significat físic. A més, cal destacar que la *funció potencial de la velocitat* només existeix si el moviment de les partícules és irrotacional.

Si es combina l'Equació (6) amb l'Equació (2), s'obté l'*equació de Laplace*. El resultat de l'equació de Laplace depèn de les condicions cinemàtiques, les quals es poden deduir de les equacions de la velocitat de les partícules d'aigua.

Per altra banda, si en l'Equació (5) es substitueix la velocitat de les partícules d'aigua per les derivades espacials de l'Equació (6), s'obté l'*equació de Bernoulli linealitzada per flux no estacionari*.

Amb l'equació de Laplace i la de Bernoulli es pot deduir la pressió induïda de les onades.

#### 4.2.2.1. Equació de conservació de l'energia

Donades unes condicions de contorn, el model SWAN estima l'espectre de densitat d'energia en cada punt del domini estudiat. Per a predir l'espectre de densitat d'energia, el model SWAN crea un balanç d'energia de densitat local en diferents punts del domini i en el mateix temps, fins que el flux es torni estacionari.

Per tant, dit en altres paraules, es divideix el domini mitjançant una malla i el model SWAN calcula la quantitat d'energia acumulada en cada node de la malla.

Si es considera una malla amb una mida de cel·la  $\Delta x$  en l'eix  $x$  i  $\Delta y$  en l'eix  $y$ :

$$\frac{\partial E(f, \theta, x, y, t)}{\partial t} = S(f, \theta, x, y, t) - \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta, x, y, t)}{\partial x} - \frac{\partial c_{g,y} E(f, \theta, x, y, t)}{\partial y} - \frac{\partial c_{\theta} E(f, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} \quad (7)$$

On el terme de l'esquerra és la variació d'energia de la cel·la. El primer terme de la dreta és la dissipació/generació local d'energia. Els dos següents termes són el transport net d'energia en la direcció de la propagació. L'últim terme de la dreta és el transport net d'energia degut a la dissipació i a la refracció.

#### 4.2.2.2. Equació de conservació de l'acció de l'onatge

El model SWAN considera la interacció entre onades i corrents, és per això que es basa en l'equació de conservació de l'acció de l'onatge. L'equació de conservació de l'acció de l'onatge s'obté a partir de l'expressió:

$$N(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t) = \frac{E(f, \theta, x, y, t)}{\sigma_{rel}} \quad (8)$$

On  $\sigma$  és la freqüència radial relativa.

S'estableix com a freqüència radial relativa aquella en que no es produeix efecte Doppler, és a dir, quan el sistema de referència viatja a la mateixa velocitat que la corrent.

L'equació de conservació de l'acció de l'onatge conté els mateixos termes que l'equació de conservació l'energia més un terme addicional  $c_{\sigma_{rel}}$  (Equacions (9) i (7), respectivament). Aquest terme representa la velocitat de propagació. Per tant, l'equació de conservació de l'acció de l'onatge serà:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t)}{\partial t} = & S(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t) - \frac{\partial c_{g,x} E(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t)}{\partial x} - \frac{\partial c_{g,y} E(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t)}{\partial y} \\ & - \frac{\partial c_{g,\theta} E(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma_{rel}} N(\sigma_{rel}, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma_{rel}} \end{aligned} \quad (9)$$

On l'últim terme de la dreta representa la freqüència relativa deguda a la variació de la profunditat i de les corrents.

### 4.2.3. Propagació

#### 4.2.3.1. Shoaling

Quan una onada es propaga per un fons amb pendents suaus, la freqüència ( $w$ ) romana constant. Considerant la relació de depressió, la qual és vàlida al usar la Teoria Lineal, on  $c$  és la celeritat,  $k = 2\pi/L$  és el número d'ona i  $h$  la profunditat:

$$w^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad (10)$$

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kh) \quad (11)$$

En l'Equació (10), considerant que la freqüència romana constant, es pot veure com el número d'ona augmenta si decreix la profunditat. A més, tenint en compte que  $k = 2\pi/L$ , la longitud d'ona disminuirà al disminuir la profunditat.

A mesura que les ones avancen cap a aigües someres, el número d'ona i la celeritat de grup convergeixen fins arribar a zero en la línia de costa. Això vol dir que a mesura que les onades viatgen cap a aigües someres, aquestes són cada vegada menys dispersives.

Aquestes variacions en la celeritat de grup, provoquen variacions en l'energia de les onades en la línia de costa, augmentant així l'amplitud de les onades davant la línia de costa. Per tant, quan l'onada es propaga en aigües someres, es produeix una disminució en la longitud de les ones i un augment de l'amplitud. Aquests dues variacions provoquen que l'onada sigui cada vegada més inestable i trenqui al arribar a la costa.

El model SWAN contempla la propagació en aigües someres amb la hipòtesi d'escala de grup d'ona (Garcia-Leon et al., 2013).

#### 4.2.3.2. Refracció

Es considera una onada incidint de forma obliqua a la línia de costa sobre un fons amb pendents suaus. A mesura que l'onada s'apropa a la línia de costa, poc a poc, l'angle d'incidència de l'onada anirà canviant fins a estar el més paral·lel possible a la línia de costa, és a dir, es produirà una refracció.

Aquesta variació en l'angle d'incidència es degut a que hi ha una variació de la profunditat al llarg de la cresta de l'ona. Això provoca que diferents punts de la cresta de l'onada tinguin diferents celeritats.

El model SWAN considera la refracció com una transferència progressiva de la quantitat de moviment des d'una direcció inicial fins a una direcció final.

### 4.3. Model XBeach

El Model XBeach és una model numèric de simulació de processos hidrodinàmics, processos morfodinàmics i d'impactes costaners. És un model que permet simular la hidrodinàmica de la zona que s'està estudiant. Dins dels processos hidrodinàmics i morfodinàmics, el model XBeach té en compte diferents fenòmens.

En els processos hidrodinàmics, el model XBeach inclou la transformació d'ones curtes (refracció, shoaling i trencament), la transformació d'ones llargues (generació, propagació i dissipació), el set-up produït per les onades, corrents inestables i la inundació.

En canvi, per als processos morfodinàmics, aquest model inclou la càrrega de fons, el transport de sediments en suspensió, l'abalançament del llit marí i la re configuració del fons.

#### 4.3.1. Model hidrodinàmic

El model hidrodinàmic permet escollir tres escales de temps diferents per resoldre el procés de simulació. Així doncs, el model hidrodinàmic consta de tres models: model estacionari, model surf beat i model no hidroestàtic.

El model estacionari, contempla la força estacionària de l'equació de conservació de l'acció de l'onatge i la pressió hidrostàtica. En canvi, les onades infragravitacionals es negligeixen. Aquest model és d'utilitat quan les ones incidents són curtes o bé, per calcular els canvis morfodinàmics causats per les tempestes.

El model surf beat s'utilitza quan les onades llargues són les que controlen el procés del run-up i swash, és a dir, en platges dissipatives (pendents suaus) i en platges intermitges (pendents moderades). Aquest model calcula el moviment de les onades curtes mitjançant l'equació de l'acció de les onades dependent del temps, i considera la pressió hidrostàtica i les onades infragravitacionals de forma individual.

El tercer model, no considera l'equació de conservació de l'acció de l'onatge. No obstant, considera una distribució de pressions no hidrostàtica, les onades infragravitacionals i les onades curtes. Aquestes dues últimes, es calculen de forma individual. El model no hidroestàtic, s'utilitza en platges reflexives (pendent pronunciada), quan la reflexió/difracció són processos dominants o bé, en el cas que es necessiti una modelització precisa d'onades asimètriques.

#### 4.3.2. Ones curtes

Les onades curtes, també conegudes com onades generades pel vent o ones de gravitació superficials, són onades amb un període inferior a 30 segons. Aquestes onades són generades



per les condicions de vent local, propagades a través del mar fins que finalment trenquen a la costa (Holthuijsen, 2007).

#### 4.3.2.1. Equació de conservació de l'acció d'ones curtes

La força de l'onatge en l'equació de la quantitat de moviment en aigües poc profundes, s'obté a partir d'una versió dependent del temps de l'equació de conservació de l'acció de l'onatge (Manual XBeach). Tal i com es mostra en l'Equació (12):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = - \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma_{int}} \quad (12)$$

On el primer terme de l'esquerra representa el canvi local de l'acció de l'onatge. El segon i tercer terme, representen l'import net de l'acció de l'onatge degut a la propagació unidireccional. L'últim terme de l'esquerra és l'import net de l'acció de l'onatge degut a les corrents i a la refracció del fons. La suma de tots els termes mencionats, és igual a la dissipació local de l'acció de l'onatge deguda al trencament de les onades ( $D_w$ ), a la fricció del fons ( $D_f$ ) i a la vegetació ( $D_v$ ).

L'acció de les onades es pot definir com:

$$N(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma_{int}(x, y, t)} \quad (13)$$

On  $\theta$  és l'angle d'incidència en l'eix  $x$ ,  $S_w$  és l'espectre d'energia i  $\sigma_{int}$  és la freqüència intrínseca de l'onada, la qual s'obté a partir de la relació de dispersió.

#### 4.3.2.2. Interacció entre onatge i corrents

La interacció entre ones i corrents implica un intercanvi d'energia, és a dir, tant les onades com les corrents s'afecten entre elles.

El model XBeach contempla aquestes interaccions mitjançant la velocitat de grup i la velocitat de propagació. La velocitat de propagació de l'acció d'ona ve donada per l'Equació (14) i per l'Equació (15):

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos(\theta) + u^L \quad (14)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin(\theta) + v^L \quad (15)$$

$u^L$  i  $v^L$  són les velocitats Lagrangianes de la velocitat mitjana transversal i longitudinal, respectivament.  $c_g \cos(\theta)$  i  $c_g \sin(\theta)$  són la velocitat de grup transversal i longitudinal, respectivament.

#### 4.3.2.3. Tensor de radiació de l'ona trencada

El tensor de radiació es pot definir com l'excés de flux de *momentum* de l'onatge.

$$\begin{aligned} S_{xx,r}(x, y, t) &= \int \cos^2(\theta) S_r d\theta \\ S_{xy,r}(x, y, t) &= S_{yx,r}(x, y, t) = \int \sin(\theta) \cos(\theta) S_r d\theta \\ S_{yy,r}(x, y, t) &= \int \sin^2(\theta) S_r d\theta \end{aligned} \quad (16)$$

On  $S_{xx,r}$  i  $S_{yy,r}$  són els esforços normals,  $S_{xy,r}$  i  $S_{yx,r}$  són els esforços tallants i  $S_r$  és la densitat d'energia cinètica de l'ona trencada. El tensor de radiació representa com canvia la quantitat de moviment horitzontal en una columna d'aigua degut a l'existència d'una força addicional produïda per les onades.

#### 4.3.2.4. Balanç d'energia de l'ona trencada

Mentre el balanç de l'acció d'ona descriu la propagació i el descens d'energia, sovint s'ha observat que hi ha un retard entre el punt on les ones comencen a trencar i el punt on es comença a generar el set-up i la corrent longitudinal. ([Manual XBeach](#)). Aquest efecte en la zona de transició s'atribueix a l'emmagatzematge temporal de l'impuls en la superfície de trencament.

El trencament d'ona exerceix una tensió sota l'aigua, la qual ve descrita per l'Equació (17):

$$\tau_{trencament} = \frac{\rho g R}{L} \beta_s \quad (17)$$

On  $\beta_s$  és la pendent del front d'ona trencant,  $R$  l'àrea de trencament i  $L$  la longitud d'ona.

L'equació del balanç de l'energia de l'ona trencada s'extreu de l'equació de l'acció de l'onatge mitjançant el terme de dissipació per el trencament d'ona,  $D_w$ :

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x S_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y S_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta S_r}{\partial \theta} = -D_r + D_w \quad (18)$$

El primer terme de la dreta és el canvi local de la densitat d'energia cinètica. El segon i tercer terme representen l'import net de la densitat d'energia cinètica deguda a la unidireccionalitat de la propagació. I l'últim terme de la dreta és l'import net de la densitat de l'energia cinètica degut a les corrents i a la fricció del fons. En la part esquerra de l'equació,  $D_w$  és la dissipació deguda al trencament de lona i  $D_r$  és la dissipació deguda a la superfície de radiació.  $D_r$  ve definida per l'Equació (19):

$$D_r = \tau_{roller} \cdot c_g = \frac{\rho g R}{L} \beta_s c_g \quad (19)$$

Per tant, l'energia cinètica local de l'ona trencada és:

$$E_r(x, y, t) = \int_0^{2\pi} S_r(x, y, t, \theta) d\theta = \frac{1}{2} \frac{\rho R_{transv} (u_{roller}^2 + w_{roller}^2)}{L} \quad (20)$$

On  $u_{roller}^2$  i  $w_{roller}^2$  són els components de la velocitat de trencament,  $L$  la longitud d'ona,  $R_{transv}$  és l'àrea transversal de trencament de l'ona i  $\rho$  és la densitat de l'aigua.

#### 4.3.2.5. Força de l'onatge

La força de les onades curtes s'obté afegint la contribució de la superfície espumosa al tensor de radiació:

$$F_x(x, y, t) = - \left( \frac{\partial S_{xx,w} + \partial S_{xx,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,w} + \partial S_{xy,r}}{\partial y} \right)$$

$$F_y(x, y, t) = - \left( \frac{\partial S_{xy,w} + \partial S_{xy,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy,w} + \partial S_{yy,r}}{\partial y} \right) \quad (21)$$

#### 4.3.3. Ones llargues

Les ones llargues, també conegudes com ones gravitacionals, són degudes a una variació horitzontal en el transport de la quantitat de moviment de l'ona. En aigües profundes aquest fenomen és de poca importància, però a la zona de surf adquireix una gran rellevància. Això es degut a que aquestes variacions produeixen forces al volum d'aigua, causant canvis en el nivell mig del mar i generant corrents (Holthuijsen, 2007).

Ha estat demostrat que les onades llargues juguen un paper crucial en els processos del swash, influint així en l'erosió de les dunes (Roelvink et al., 2009).

##### 4.3.3.1. Equacions en aigües someres

Per modelar ones de períodes llargs, es fan servir les equacions d'aigües someres. Per dur a terme aquesta modelització, s'usa la formulació matemàtica de la Mitjana Lagrangiana Generalitzada (GLM), la qual permet separar el moviment de les ones curtes del moviment de les ones llargues. Per fer-ho, les equacions de continuïtat i quantitat de moviment es formulen en termes de la velocitat Lagrangiana.

La velocitat Lagrangiana es defineix com la distància recorregida per una partícula d'aigua en un període d'ona, dividit per aquest període d'ona.

$$u^L = u^E + u^S$$

$$v^L = v^E + v^S \quad (22)$$

On  $u^L$  i  $v^L$  són la velocitat transversal i longitudinal Lagrangiana, respectivament.  $u^E$  i  $v^E$  són la velocitat transversal i longitudinal Euleriana, respectivament. I  $u^S$  i  $v^S$  són la velocitat transversal i longitudinal de deriva de Stokes, respectivament.

L'equació de la quantitat de moviment en l'eix  $x$  i  $y$  resulta:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - V_h \left( \frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) &= \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \\ \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - V_h \left( \frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) &= \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h}\end{aligned}\quad (23)$$

On  $\tau_{sx}$  i  $\tau_{sy}$  representen la fricció amb el vent,  $\tau_{bx}^E$  i  $\tau_{by}^E$  representen la fricció amb el fons,  $\eta$  és el superfície lliure,  $F_x$  i  $F_y$  representen la tensió induïda per les ones,  $F_{v,x}$  i  $F_{v,y}$  representa la tensió induïda per la vegetació,  $V_h$  és la viscositat horitzontal i  $f$  és el coeficient de Coriolis.

D'altra banda, considerant que la densitat romana constant ( $\partial \rho / \partial t = \partial \rho / \partial x = 0$ ), l'equació de la continuïtat ve donada per l'Equació (24).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^2}{\partial x} + \frac{\partial h v^2}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

On  $h$  és la profunditat.

#### 4.3.4. Transport de sediments

El transport de sediments, de forma simplificada, es pot definir en tres fases: l'arrossegament dels sediments causat per les forces que actuen sobre el fons marí, el transport de sediment i l'assentament i deposició dels sediments en el fons marí. Depenent de la velocitat de caiguda del sediment i de la velocitat del flux en que aquest canvia pot passar que, abans de que el sediment arribi a depositar-se en el fons marí, torni a començar el procés.

##### 4.3.4.1. Equació advecció-difusió

L'advecció i la difusió són dos processos diferents de transport de massa. En el transport per advecció, el sediment dissolt es transportat amb el fluid. En canvi, en el transport per difusió, el sediment en l'aigua es mou des d'àrees de major concentració cap a àrees de menor concentració.

L'equació advecció-difusió, descriu els fenòmens de transport de sediments mitjançant el moviment de l'aigua (advecció) i mitjançant els gradients de concentració (difusió). Aquests dos mecanismes de transport de sediments, es modelen a partir de l'equació de transport mitjà en profunditat:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + q_x + q_y = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (25)$$

El primer terme de l'esquerra representa la variació local de concentració de sediment.  $q_x$  i  $q_y$  són la taxa de transport de sediment transversal i longitudinal, respectivament. El terme de la dreta és l'arrossegament o deposició de sediments. L'arrossegament o deposició de sediments es representa mitjançant el temps d'adaptació del sediment ( $T_s$ ), el qual es defineix mitjançant l'Equació (26):

$$T_s = \max\left(f_{T_s} \frac{h}{w_s}, T_{s,min}\right) \quad (26)$$

On  $h$  és la profunditat local,  $w_s$  és la velocitat de caiguda del sediment,  $C_{eq}$  és la concentració en equilibri,  $C$  la concentració de sediment mitjana en profunditat i  $f_{T_s}$  és un factor de correcció i calibratge.

Les taxes de transport de sediments es poden definir com:

$$\begin{aligned} q_x &= \frac{\partial h C u^E}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] \\ q_y &= \frac{\partial h C v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

On  $D_h$  és el coeficient de difusió i  $u^E$  i  $v^E$  són la velocitat transversal i longitudinal Euleriana, respectivament. El primer terme de la dreta és el transport de sediment per advecció i el segon terme és el transport de sediments per difusió.

#### 4.3.4.2. Equacions de transport de sediments

El model XBeach disposa de dues formulacions per al transport de sediments, però la formulació que millor s'adapta per al sediment fi són les equacions de [Van Rijn et al., 2007](#).

La concentració de sediment en equilibri per a les equacions de transport de sediments, ve definida per l'Equació (28):

$$C_{eq} = \max\left(\min\left(C_{eq,b}, \frac{1}{2} C_{max}\right) + \min\left(C_{eq,s}, \frac{1}{2} C_{max}\right), 0\right) \quad (28)$$

On  $C_{max}$  és la concentració màxima de sediment i  $C_{eq,b}$  i  $C_{eq,s}$  són les concentracions de sediment en equilibri per arrossegament de fons i per suspensió, respectivament.

En les equacions de Van Rijn el coeficient d'arrossegament no es calcula i la velocitat crítica es determina calculant separatament la velocitat crítica per a onades  $U_{crw}$  i per a les corrents  $U_{crr}$ . Les concentracions de sediment en equilibri per al transport de fons i en suspensió es calculen d'acord amb les Equacions (29) i (30):

$$C_{eq,b} = \frac{A_{sb}}{h} \left( \sqrt{v_{mg}^2 + 0,64 u_{rms,2}^2} - U_{cr} \right)^{1,5} \quad (29)$$

$$C_{eq,s} = \frac{A_{ss}}{h} \left( \sqrt{v_{mg}^2 + 0,64u_{rms,2}^2} - U_{cr} \right)^{2,4} \quad (30)$$

Les diferents variables que conformen la formulació de Van Rijn es defineixen a continuació:

- $A_{sb}$  i  $A_{ss}$  són els coeficients de càrrega per arrossegament de fons i suspensió, respectivament.

$$\begin{aligned} A_{sb} &= 0,015h \frac{(D_{50}/h)^{1,2}}{(\Delta g D_{50})^{0,75}} \\ A_{ss} &= 0,012D_{50} \frac{D_*^{-0,6}}{(\Delta g D_{50})^{1,2}} \end{aligned} \quad (31)$$

On  $D_{50}$  és el diàmetre mig de partícula del sediment i  $D_* = D_{50} \cdot (\Delta g / \nu^2)^{1/3}$  és el paràmetre adimensional del diàmetre mig de sediment, sent  $\nu$  la viscositat cinemàtica.

- $v_{mg}$  és la magnitud de la velocitat, la qual és el mòdul de la velocitat Euleriana.

$$v_{mg} = \sqrt{(v^E)^2 + (u^E)^2} \quad (32)$$

- $u_{rms,2}$  és la velocitat orbital ajustada. Aquesta velocitat té en compte la turbulència induïda pel trencament d'ona a caus d'ones curtes.

$$u_{rms,2}^2 = u_{rms}^2 + 1,45k_b \quad (33)$$

$k_b$  és el paràmetre d'ajust, el qual representa la turbulència induïda pel trencament d'ona degut a ones curtes i  $u_{rms}$  és la velocitat orbital.

- $C_d$  és el paràmetre d'arrossegament.

$$C_d = \left( \frac{0,40}{\ln\left(\frac{\max(h, 10z_0)}{z_0}\right) - 1} \right)^2 \quad (34)$$

$z_0$  és la longitud de la rugositat del llit marí.

- $U_{cr}$  és la velocitat crítica. Aquesta velocitat defineix a quina profunditat s'inicia el moviment del sediment.

$$U_{cr} = \beta U_{crc} + (1 - \beta) U_{crw} \quad (35)$$

On  $\beta$  es defineix com:

$$\beta = \frac{v_{mg}}{v_{mg} + u_{rms}} \quad (36)$$

- $U_{crc}$  és la velocitat crítica per a les corrents.

$$U_{crc} = \begin{cases} 0,19D_{50}^{0,1} \log_{10} \left( \frac{4h}{D_{90}} \right), & \text{per a } D_{50} \leq 0,0005 \\ 8,5D_{50}^{0,6} \log_{10} \left( \frac{4h}{D_{90}} \right), & \text{per a } D_{50} \leq 0,002 \\ 1,3\sqrt{\Delta g D_{50}} \left( \frac{h}{D_{50}} \right)^{1/6}, & \text{per a } D_{50} > 0,0005 \end{cases} \quad (37)$$

- L'últim paràmetre és la velocitat crítica per a onades  $U_{crw}$ .

$$U_{crw} = \begin{cases} 0,24(\Delta g)^{2/3} (D_{50} T_{rep})^{1/3}, & \text{per a } D_{50} \leq 0,0005 \\ 0,95(\Delta g)^{0,57} (D_{50})^{0,43} T_{rep}^{0,14}, & \text{per a } D_{50} > 0,0005 \end{cases} \quad (38)$$

#### 4.3.4.3. Efecte de la pendent del fons

La pendent del llit marí afecta al transport de sediments de diverses formes:

- Pot afectar el rati i/o direcció de transport de sediments una vegada el sediment està en moviment.
- Influencia la velocitat local del flux prop del llit.
- Pot canviar el llindar de condicions per al qual s'inicia el moviment de sediments.

Per canviar la magnitud del transport de sediments segons la pendent del fons, el programa XBeach utilitza l'Equació (39), la qual es pot aplicar al transport de sediment total o només al transport per arrossegament.

$$\begin{aligned} q_{x,pendent} &= q_x - \alpha h C \sqrt{(u^L)^2 + (v^L)^2} \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ q_{y,pendent} &= q_y - \alpha h C \sqrt{(u^L)^2 + (v^L)^2} \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{aligned} \quad (39)$$

On  $\frac{\partial z_b}{\partial x}$  i  $\frac{\partial z_b}{\partial y}$  és la pendent del fons en la direcció x i y, respectivament. I  $\alpha$  és un paràmetre empíric.

#### 4.3.5. Re configuració del fons

##### 4.3.5.1. Degut al flux de sediments

L'Equació (40) mostra el canvi del nivell del fons marí degut als gradients del transport de sediment.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-e)} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (40)$$

On  $e$  és la porositat i  $f_{mor}$  és el factor d'acceleració morfològica. Aquest factor d'acceleració morfològica s'usa per reduir el cost computacional del model, i només es fa servir quan els canvis en el nivell de l'aigua no afecten de forma significant la resposta hidrodinàmica del model.

##### 4.3.5.2. Degut a inestabilitat del talús

L'allau es produeix quan la duna és molt empinada. El model XBeach considera dues pendent crítiques ( $m_{cr}$ ) segons si el material està sec o mullat.

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad (41)$$

On  $\partial z_b / \partial x$  és la pendent actual i  $m_{cr}$  és la pendent crítica. Els valors predeterminats del pendent crític són: 0,3 quan el material està mullat i 1 quan està sec. Quan se supera aquest pendent crític, el material s'intercanvia entre les cel·les adjacents fins a la quantitat necessària per a tornar al pendent crític ([Manual XBeach](#)).

Per a evitar la generació d'ones de gran impacte degut a una re configuració brusca del llit marí, s'ha limitat la velocitat màxima ( $v_{av,max}$ ) de re configuració del llit marí a causa d'abalançaments.

$$\Delta z_b = \begin{cases} \min \left( \left( \left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, & v_{av,max} \Delta t \right), & \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \\ \max \left( - \left( \left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, & -v_{av,max} \Delta t \right), & \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \end{cases} \quad (42)$$

#### 4.4. Descripció dels diferents escenaris

En aquest apartat es descriuen els diferents escenaris analitzats en la zona d'estudi. Els escenaris proposats s'han simulat per a tempestes d'hivern amb una probabilitat del 0.99, ja que com es mostrarà en els resultats, aquestes són les tempestes més energètiques.

Per evitar el desplaçament de la Fletxa del Fangar i evitar el tancament de la badia, s'ha proposat la construcció d'una rasa. Per tant, per a l'obtenció de resultats s'analitzaran quatre



escenaris amb tres tipologies diferents de rases que s'anomenen: sense rasa, rasa 1, rasa 2 i rasa 1+2.

#### 4.4.1. Sense rasa

En l'escenari sense rasa es fa un estudi morfodinàmic de la zona estudiada sense la construcció de cap rasa i comparant les diferents probabilitats 0.99, 0.7 i 0.5. En aquest escenari es fa l'estudi amb cada una de les probabilitats per poder analitzar la hidrodinàmica i la morfodinàmica de la zona i així poder escollir el punt més adient per situar les diferents rases proposades.

#### 4.4.2. Rasa 1

En aquest escenari s'ha proposat la construcció d'una rasa de 47000 m<sup>3</sup> a la zona oest de la part emergida del domini. La Rasa 1 té la funció d'evitar que la Gola tanqui, per això està situada a la zona on s'han detectat les corrents longitudinals més fortes

#### 4.4.3. Rasa 2

Per aquesta alternativa s'ha considerat construir una rasa més petita, situada entre el punt de divergència i el sistema dunar de defensa, amb l'objectiu de suavitzar el punt de divergència. La finalitat d'aquesta rasa és suavitzar la línia de costa i els seus voltants, de tal manera que les ones actuïn de forma més homogènia. La Rasa 2 està situada a la zona central-est de la part emergida del domini, amb un volum de 18000 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.4. Rasa 1+2

Aquesta última alternativa és la combinació d'ambdues rases 1 i 2 a la vegada.

Tot seguit, en la Figura 6 es mostra la localització de les rases:



*Figura 6. Localització de les rases*

Per al dimensionament de les rases s'ha calculat el transport longitudinal net anual que té la cel·la és de 70000 m<sup>3</sup>/any aproximadament. Per tant, per a no provocar alteracions massa brusques en la dinàmica de la zona de surf (de 0m a -4m), el màxim volum de sediments que es pot extreure és de 70000 m<sup>3</sup>/any que és aproximadament la suma del volum de la Rasa 1 i la Rasa 2.

Per a veure l'efecte acumulatiu de varies seqüències de temporals similars, s'han realitzat simulacions amb quatre tempestes de durada: 6h, 12h, 18h i 24h. Aquest anàlisi només s'ha realitzat per a les tempestes d'hivern procedents de l'est nord-est i amb una probabilitat de 0.99, ja que s'ha pres, coma condició del costat de la seguretat, valors de pic de temporal.

La comparació d'aquestes quatre alternatives permetrà valorar amb quina s'obté millors resultats per evitar el tancament de la badia i amb quina hi ha un menor impacte tant hidrodinàmic com morfodinàmic de la zona.

## 5. RESULTATS

A continuació es mostren els resultats obtinguts de les simulacions realitzades amb el programa SWAN i el programa XBeach.

En primer lloc, s'ha realitzat un anàlisi hidrodinàmic del Delta de l'Ebre i de la Punta del Fangar per tal d'entendre millor com es propaguen les onades en el domini d'estudi. Aquest anàlisi s'ha realitzat amb les alçades d'ona amb probabilitat 0.99, 0.7 i 0.5 i en les direccions de propagació, ja esmentades anteriorment, que més afecten l'àrea d'estudi.

En segon lloc, mitjançant els resultats hidrodinàmics obtinguts, s'ha dut a terme un estudi morfodinàmic de la zona per veure quins són els patrons de corrents i el transport de sediments generats amb les condicions d'onatge actuals de la zona.

Finalment, s'ha fet un estudi hidrodinàmic i morfodinàmic del domini amb les diferents rases proposades, per obtenir els diferents patrons de corrents i transport de sediments. L'estudi s'ha fet per a les condicions d'onatge més desfavorables per estar del cantó de la seguretat.

### 5.1. Anàlisi hidrodinàmic

Els resultats de l'anàlisi hidrodinàmic s'han obtingut mitjançant el model SWAN. Aquests resultats s'han post processat amb Matlab. Els resultats mostren la distribució de l'alçada d'ona significant i la direcció d'ona mitja per a totes les direccions de tempesta rellevants.

De la Figura 7 a la Figura 12, s'hi poden observar les diferents distribucions d'ona segons la direcció de la que provenen i la probabilitat d'ocurrència.

Per a les tempestes provinents del nord-est i de l'est nord-est, a la part propera a la línia de costa s'hi produeix una major refracció que per a les tempestes provinents de l'est.

Durant els mesos d'estiu s'hi observa una alçada d'ona menor que durant els mesos d'hivern. Les majors alçades d'ona es produeixen per als mesos de desembre a febrer, per a una probabilitat d'ocurrència de 0.99 i per a les direccions provinents de l'est nord-est i de l'est. L'alçada màxima, la qual té un valor de 3.8 m, es produeix per a la direcció est nord-est durant l'estació d'hivern i amb probabilitat del 0.99

De la Figura 7 a la Figura 12, es pot observar com segons la probabilitats d'ocurrència s'hi observen diferents comportaments. Per a una probabilitat del 0.7 i 0.5, es pot veure com a profunditats majors a -20 m, l'alçada d'ona no experimenta cap canvi, i a profunditats menors la variació de l'alçada d'ona és més significativa. En canvi, per a una probabilitat d'ocurrència del 0.99, s'observa que l'alçada d'ona presenta variacions a partir dels -60 m de profunditat, en la zona sud, i dels -20 m en la zona nord del delta.

Per a una probabilitat de 0.99 on l'alçada d'ona és major, es pot observar clarament com varia l'alçada d'ona segons s'apropa a la línia de costa i segons la direcció de la que prové.

En les figures mencionades, també s'hi pot observar com a la zona sud del Delta hi ha una zona més abrigada de les ones degut a la configuració del propi delta. L'hemidelta nord i la desembocadura bloquegen gran part dels sectors direccionals considerats, creant així aquesta zona més abrigada. En la majoria dels casos per a una probabilitat de 0.99, a partir d'una profunditat de -20 m, l'alçada d'ona no supera els 1.75 m.

### 5.1.1. Recopilació de resultats: Anàlisi hidrodinàmic

#### 5.1.1.1. Període Desembre-Febrer

#### *Alçada d'ona i direcció mitja – Tempesta del nord-est (45°)*

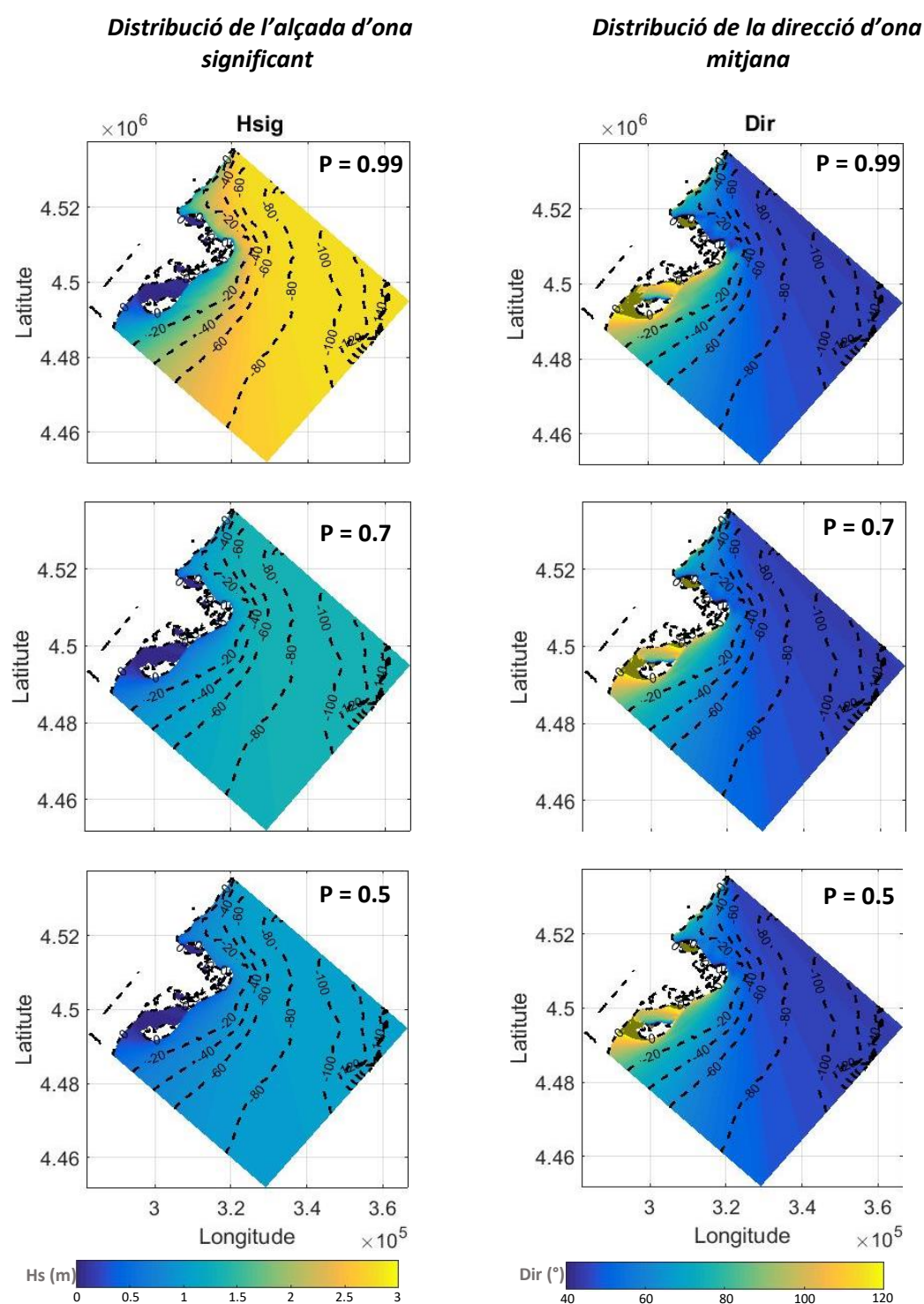


Figura 7. Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de Hs i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.

*Alçada d'ona i direcció mitja – Tempesta del est nord-est (67,5°)*

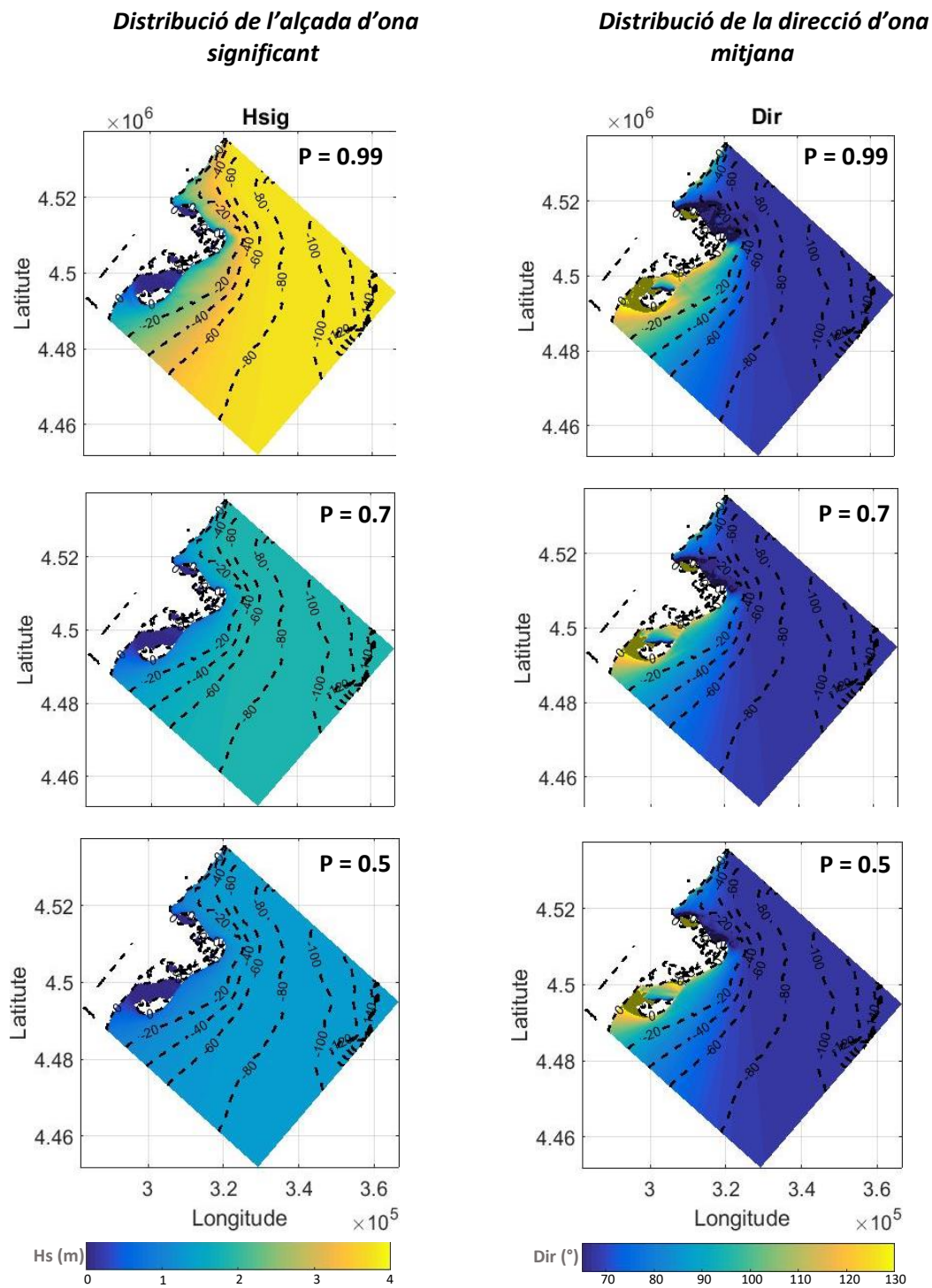
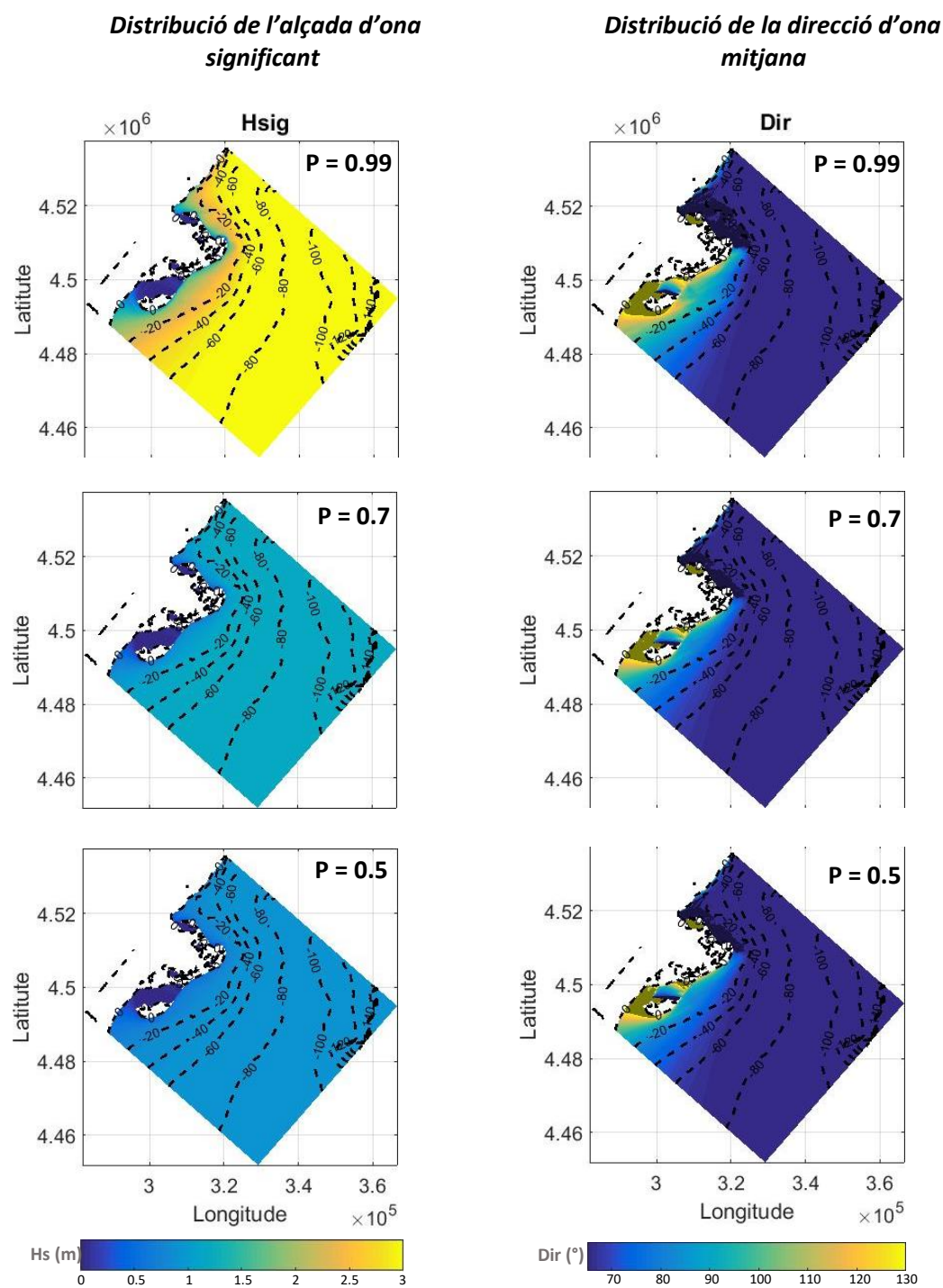


Figura 8. Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de Hs i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.



*Alçada d'ona i direcció mitja – Tempesta del est (90°)*



*Figura 9. Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de  $H_s$  i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.*

### 5.1.1.2. Període Juny-Agost

#### Alçada d'ona i direcció mitja – Tempesta del nord-est (45°)

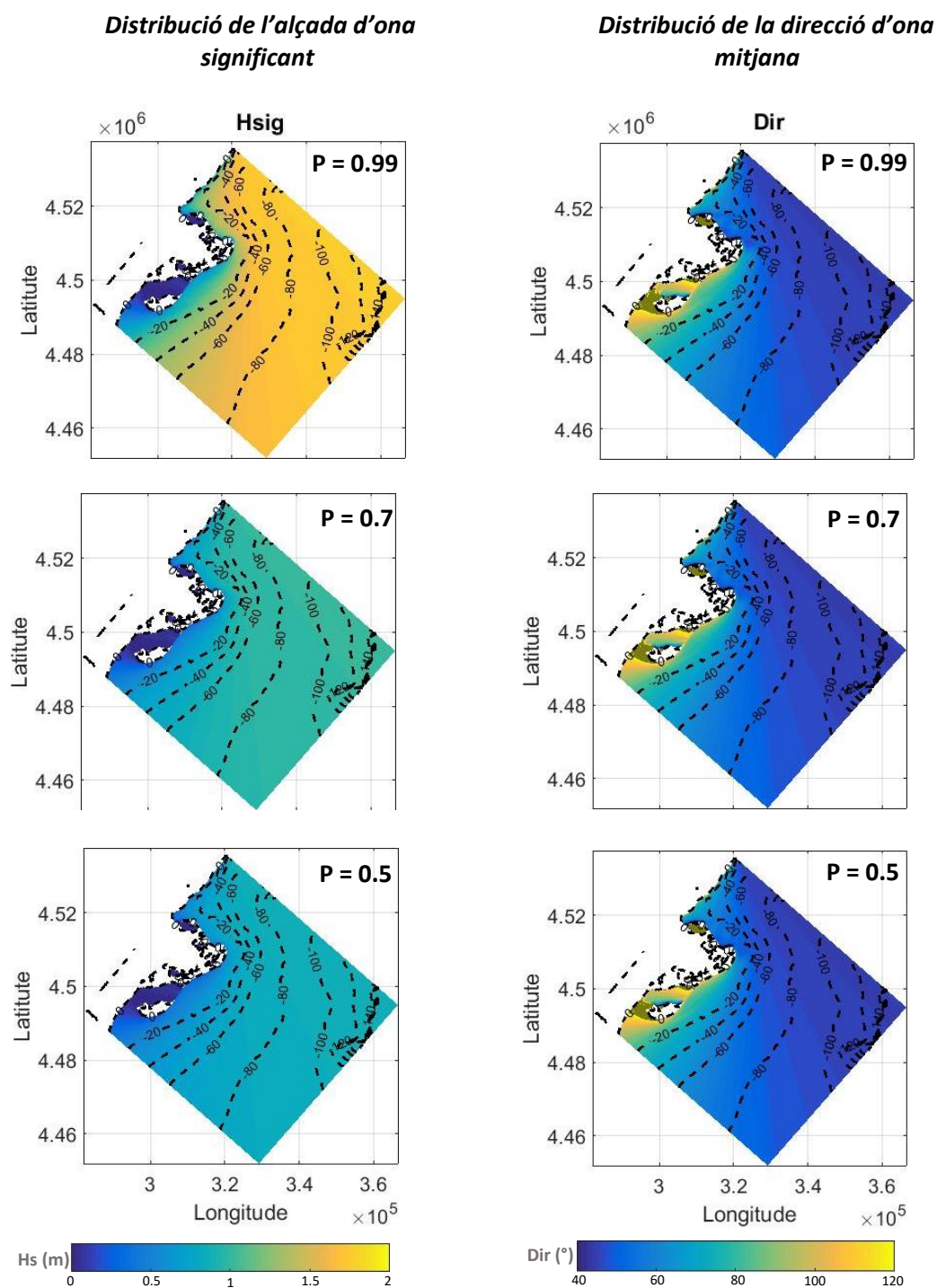


Figura 10. Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de  $H_s$  i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.

*Alçada d'ona i direcció mitja – Tempesta del est nord-est (67,5°)*

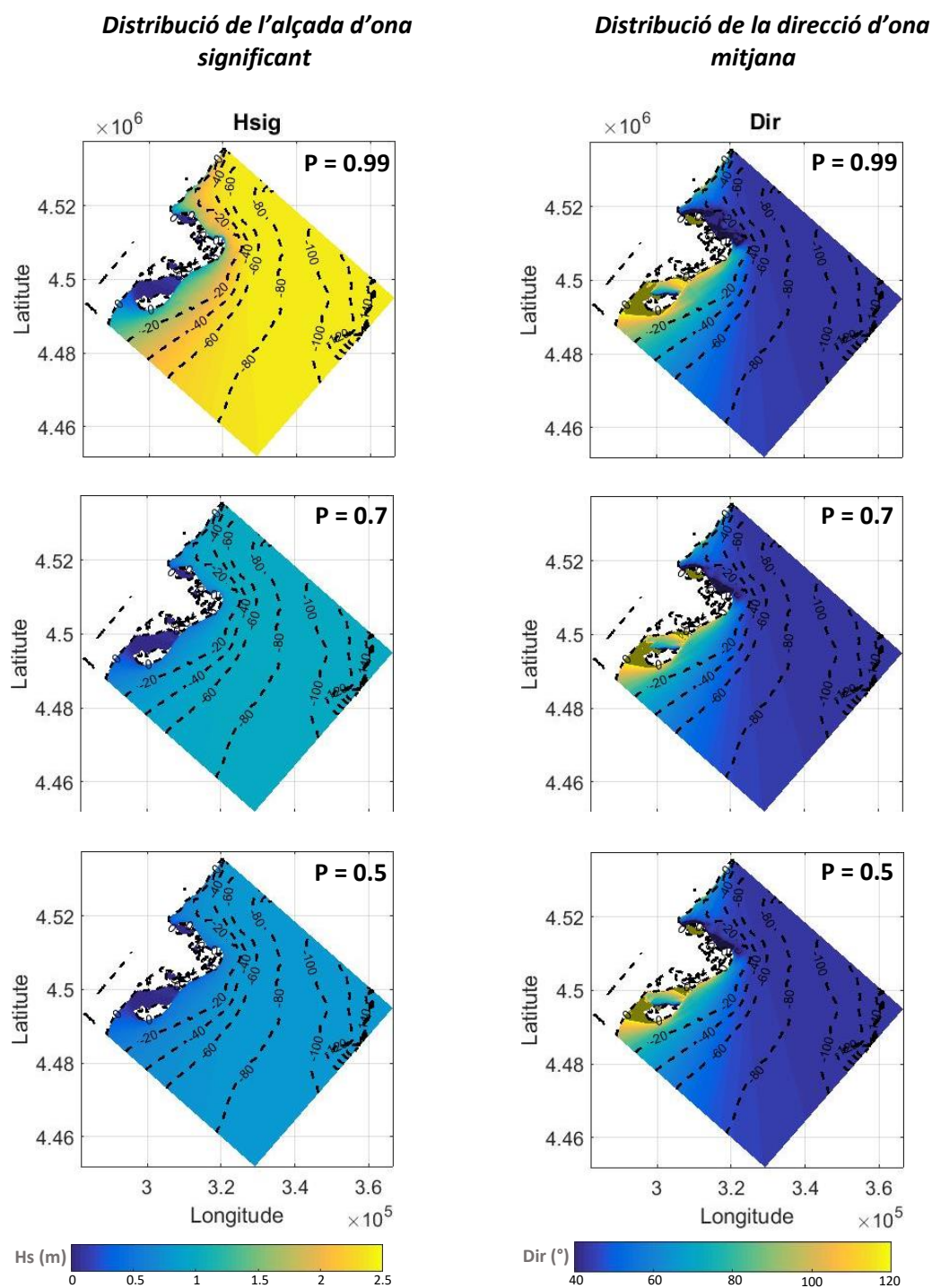


Figura 11. Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de  $H_s$  i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.



*Alçada d'ona i direcció mitja – Tempesta del est (90°)*

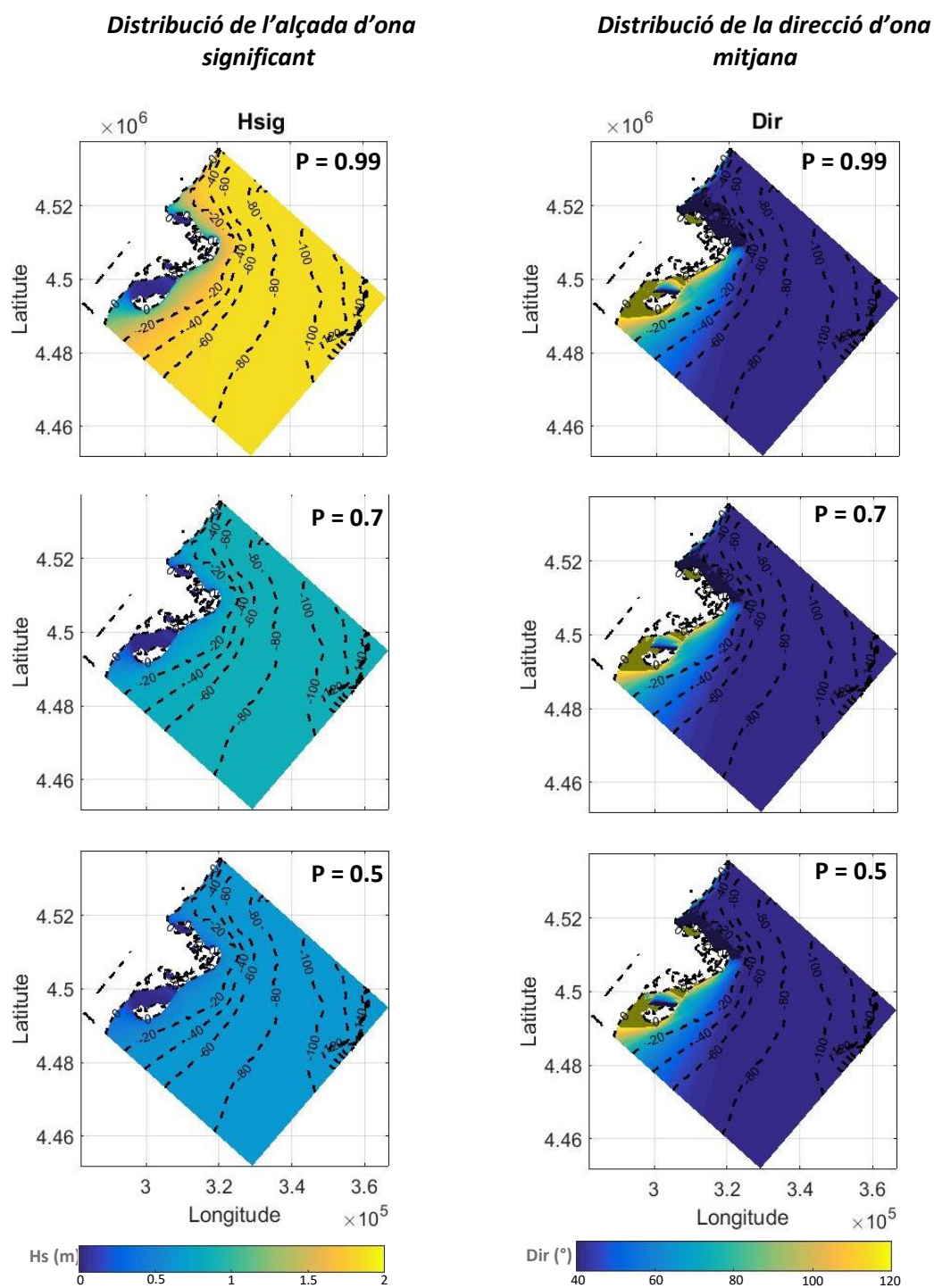


Figura 12. Distribució de l'alçada d'ona significant (esquerra) i distribució de la direcció mitjana (dreta) durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a tot el Delta de l'Ebre. El valor de  $H_s$  i de la direcció mitjana d'ona a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques

## 5.2. Anàlisi morfodinàmic

Els resultats de l'anàlisi morfodinàmic s'han obtingut mitjançant el model XBeach. Aquests resultats obtingut han estat post-processats amb Matlab. Els resultats mostren el comportament de les corrents generades per les diferents tempestes i l'acumulació o erosió de sediments causat per aquestes tempestes. Cal esmentar que l'anàlisi morfodinàmic s'ha realitzat amb les tempestes dels mesos d'hivern, les quals són les més energètiques i provoquen un major canvi en la morfologia de la zona.

### 5.2.1. Recopilació de resultats: Anàlisi morfodinàmic

#### 5.2.1.1. Període Desembre-Febrer

##### 5.2.1.1.1. Corrent longitudinal i transversal, sense rasa ( $t=6h$ )

En aquest apartat s'ha realitzat un estudi de les corrents longitudinals i transversals del domini sense rases, per a les probabilitats de 0.99, 0.7 i 0.5 i per a una tempesta de 6h. De la a la , es mostra la variació de les corrents transversals i longitudinals al final de la tempesta.

Les corrents longitudinals i transversals generades per tempestes amb probabilitat del 0.99, són majors que les generades per tempestes amb probabilitats del 0.7 i del 0.5.

S'hi pot observar que per a qualsevol direcció, en la zona oest de l'àrea d'estudi, és on s'hi genera més corrent longitudinal. D'altra banda, en la zona on hi ha les majors corrents longitudinals, és on s'hi produeixen les menors corrents transversals o en alguns casos la component transversal és nul·la.

En la part est de la zona d'estudi, s'observa com les corrents transversals adquireixen majors valors que en la zona oest. En canvi, les corrents longitudinals, a la zona est del domini, són menors que a la zona oest on es poden apreciar fortes corrents longitudinals.

Les tempestes provinents de l'est nord-est i amb una probabilitat del 0.99, a la part oest, s'hi generen les màximes corrents longitudinals i, a l'est del domini, les màximes corrents transversals. En canvi, les tempestes provinents del nord-est són les que generen les corrents longitudinals i transversals més baixes, a la part oest i est del domini, respectivament. Això és degut, principalment, al clima d'onatge considerat, ja que hi ha sectors direccionals on per a una probabilitat d'ocurrència, l'alçada d'ona és més alta o més baixa. És a dir, per a una mateixa probabilitat però considerant diferents sectors direccionals, les tempestes són més o menys energètiques.

Cal destacar la coherència de resultats entre el model d'onatge i el model morfodinàmic, ja que quan en el model d'onatge hi ha una major alçada d'ona, en el model morfodinàmic es poden observar corrents longitudinals i transversals més fortes, les quals produeixen un major canvi morfològic.

# Tempesta del nord-est (45°)

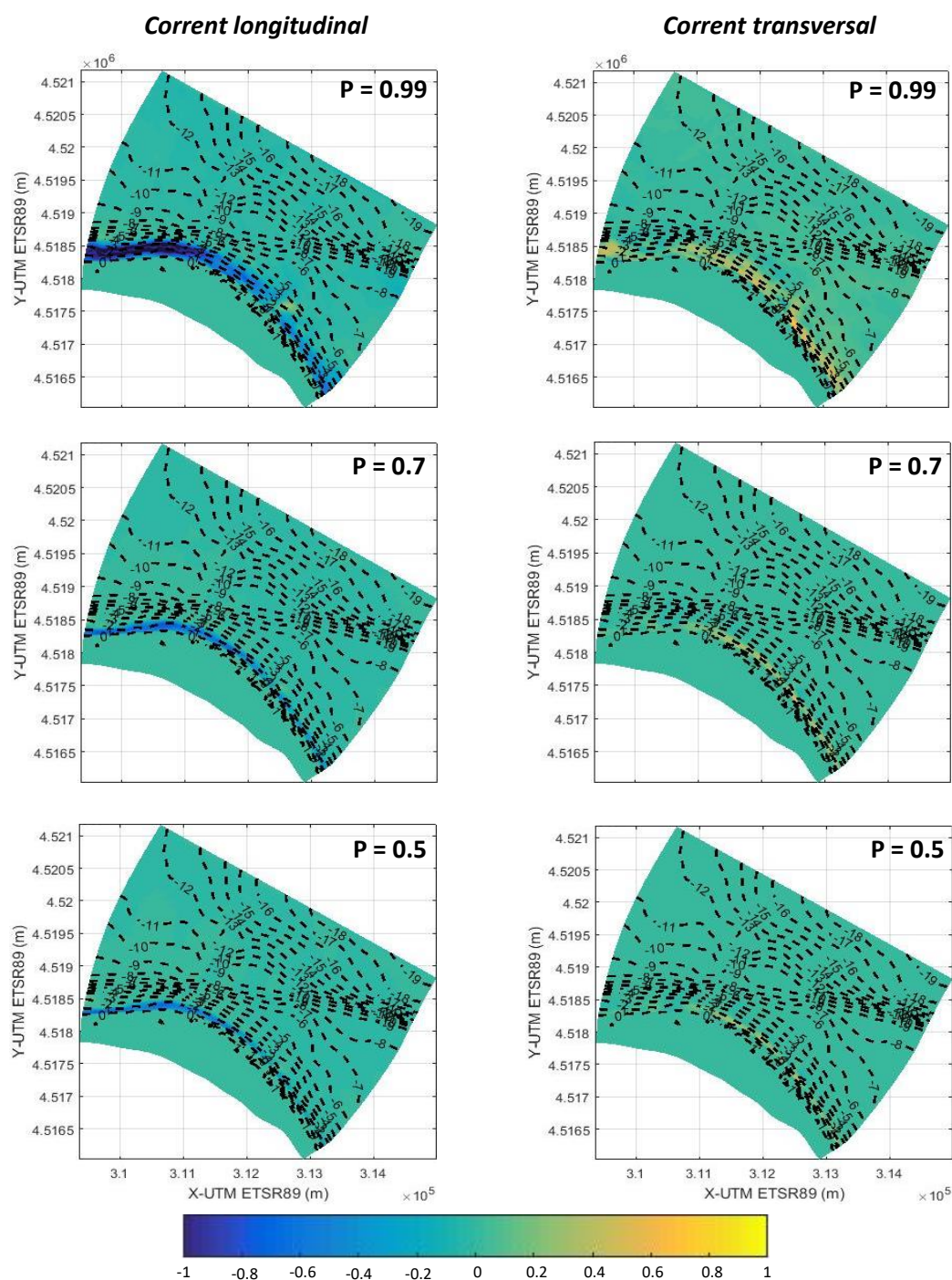


Figura 13. Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.



# Tempesta del est nord-est (67,5°)

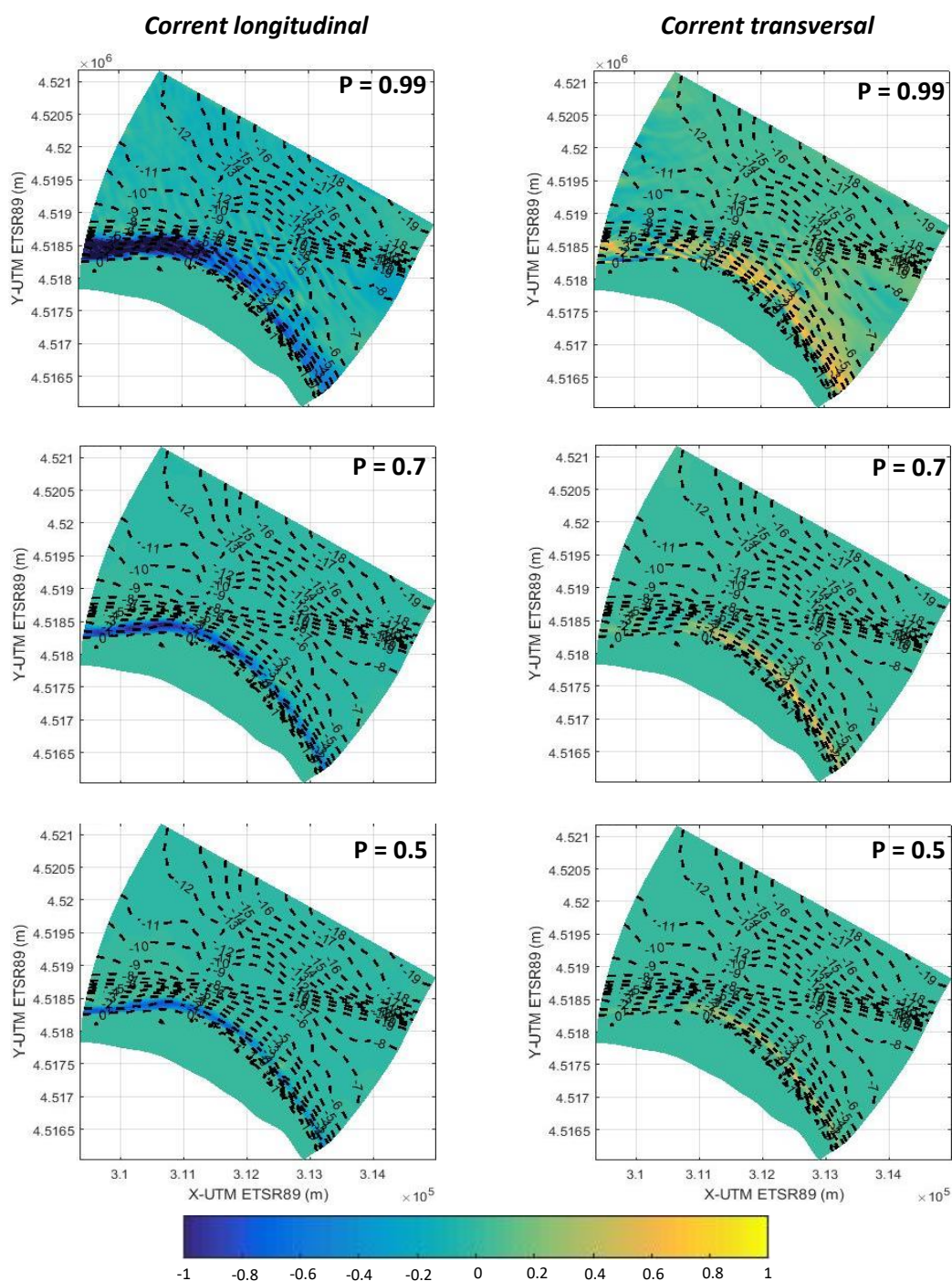


Figura 14. Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

## Tempesta del est (90°)

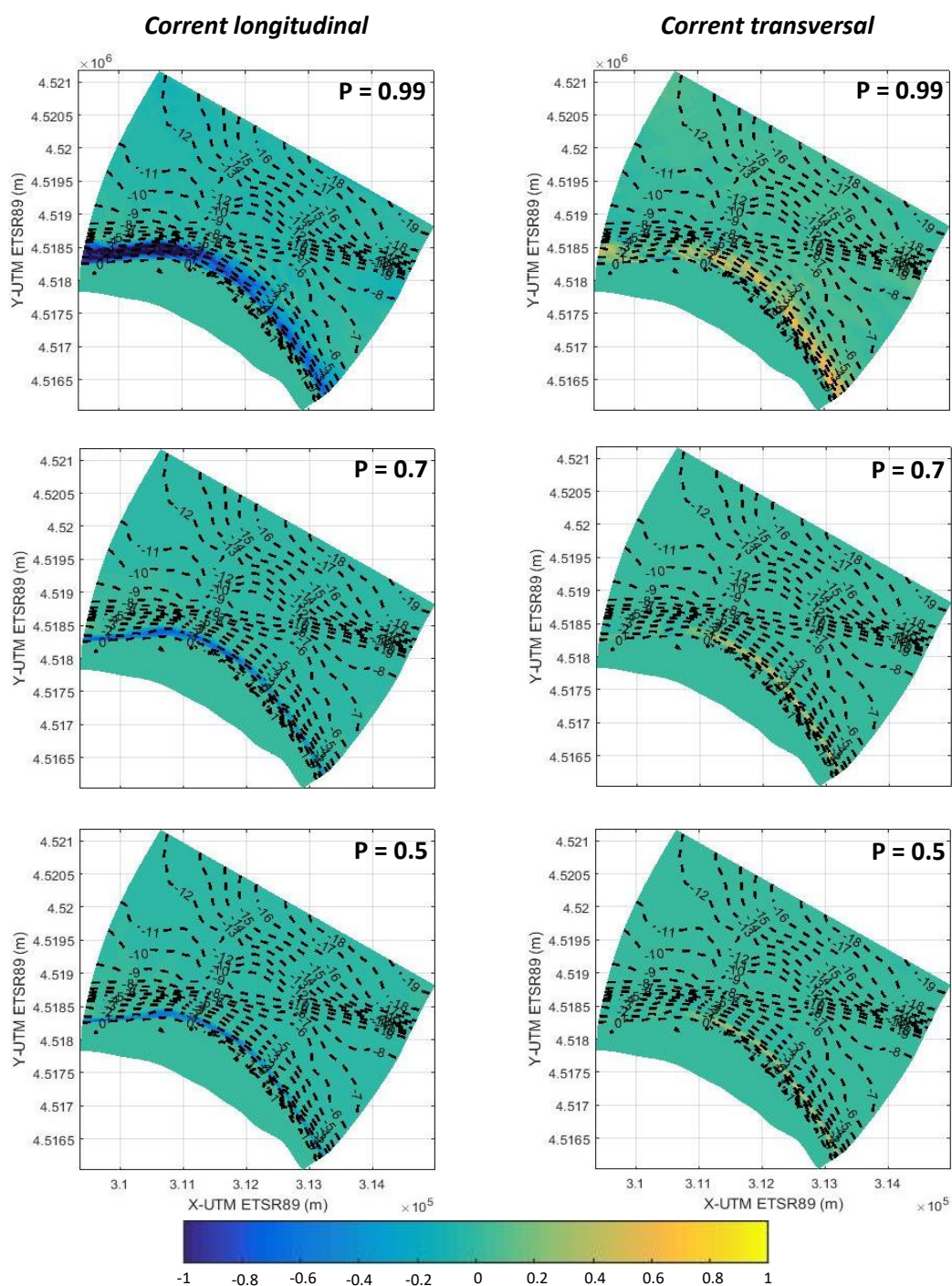


Figura 15. Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació (t=6h), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est amb probabilitats P=0.99, 0.7 i 0.5 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

#### 5.2.1.1.2. Corrent longitudinal i transversal , amb rasa (t=6)

En aquest apartat s'ha realitzat un estudi de les corrents longitudinals i transversals del domini amb rasa i sense rasa, amb una probabilitat del 0.99 i per a una tempesta de durada 6 h. De la a la , es mostra la variació de les corrents transversals i longitudinals al final de la tempesta en els escenaris amb rasa i sense rasa.

En les figures esmentades, es pot veure com en els casos amb rasa, hi ha una clara disminució de la corrent longitudinal i transversal respecte l'escenari sense rasa.

En la zona oest del domini, la Rasa 1 i la Rasa 2 presenten una clara disminució de la corrent longitudinal, de 50 cm/s en la Rasa 1 i de 70 cm/s en la Rasa 2, respecte el cas sense rasa. Tot i que per a la Rasa 1+2 aquesta disminució no és tant evident, en la zona oest també hi ha una reducció de la corrent longitudinal de 20 cm/s. Per tant, la Rasa 1, la Rasa 2 i la Rasa 1+2, presenten una reducció de la corrent longitudinal del 30%, 40% i 10%, respectivament, en comparació a l'escenari sense rasa.

D'altra banda, per a la corrent transversal també hi ha una disminució respecte el cas sense rasa. La Rasa 1 genera una gran reducció en la zona est. Aquesta disminució de la corrent transversal és de 60 cm/s. La Rasa 2 presenta una reducció, de 40 cm/s, generada bàsicament en la zona est del domini. En canvi, la Rasa 1+2, és la que provoca una menor reducció de la corrent transversal, de valor 15 cm/s. Així doncs, per a la Rasa 1, Rasa 2 i Rasa 1+2, hi ha una disminució de la corrent transversal del 60%, 40% i 15%, respectivament.

Tant el patró de corrents longitudinal com en el transversal és similar en els quatre casos. La diferència és que en el cas sense rasa, la corrent longitudinal i transversal adquireix més velocitat que en els casos amb rasa i que cada rasa produeix una disminució de les corrents de diferent valor.

D'entre les diferents rases proposades, el cas on la corrent longitudinal adquireix menys velocitat és en el cas de la Rasa 2. D'altra banda, en el cas de les corrents transversals es pot observar com en la Rasa 1 hi ha una major disminució de la corrent transversals que en la Rasa 2 i la Rasa 1+2 respecte el cas sense rasa.



## Tempesta del nord-est (45°)

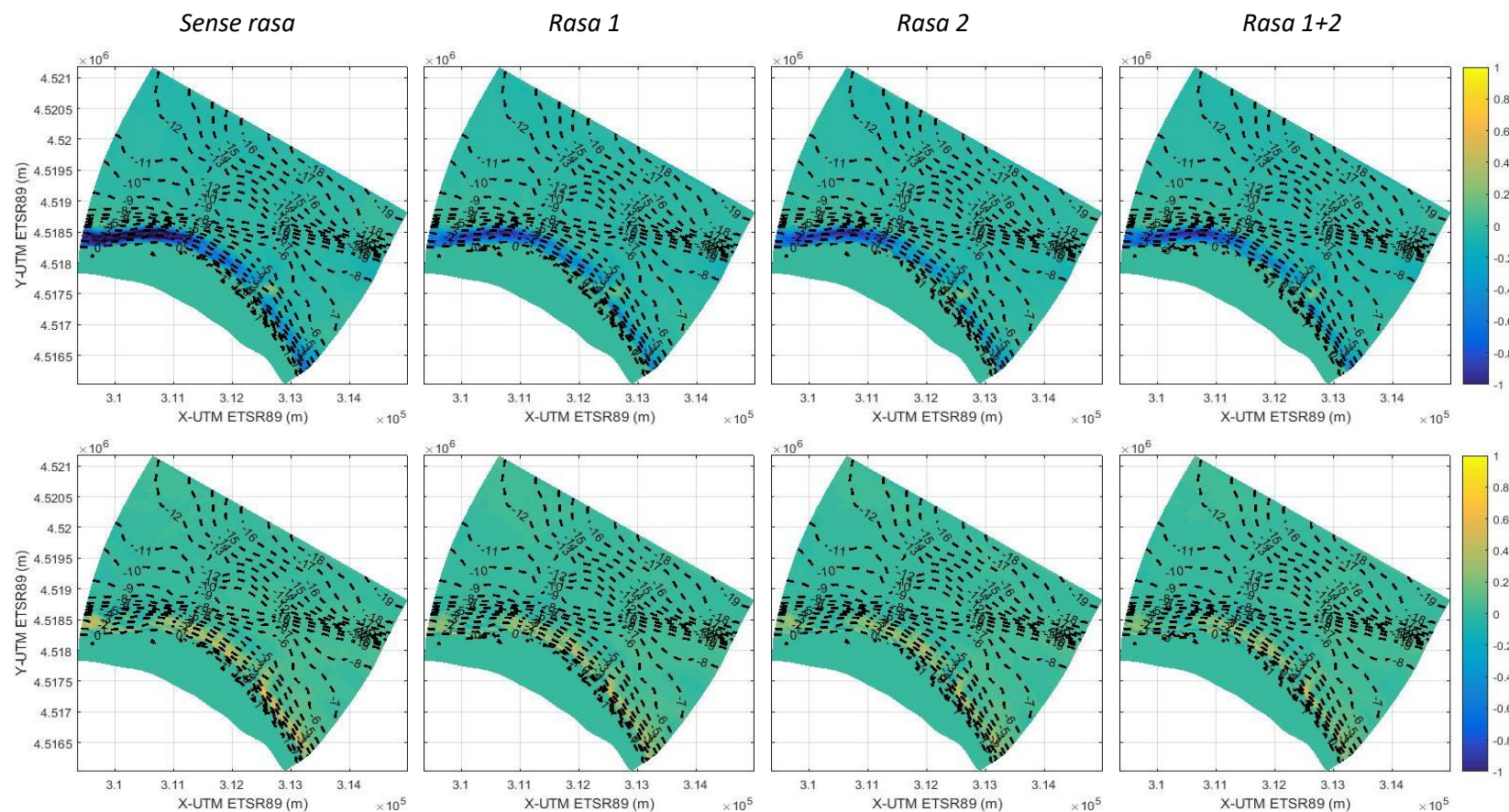


Figura 16. Variació espacial de la corrent longitudinal (a dalt) i transversal (a baix), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

## Tempesta del est nord-est (67,5°)

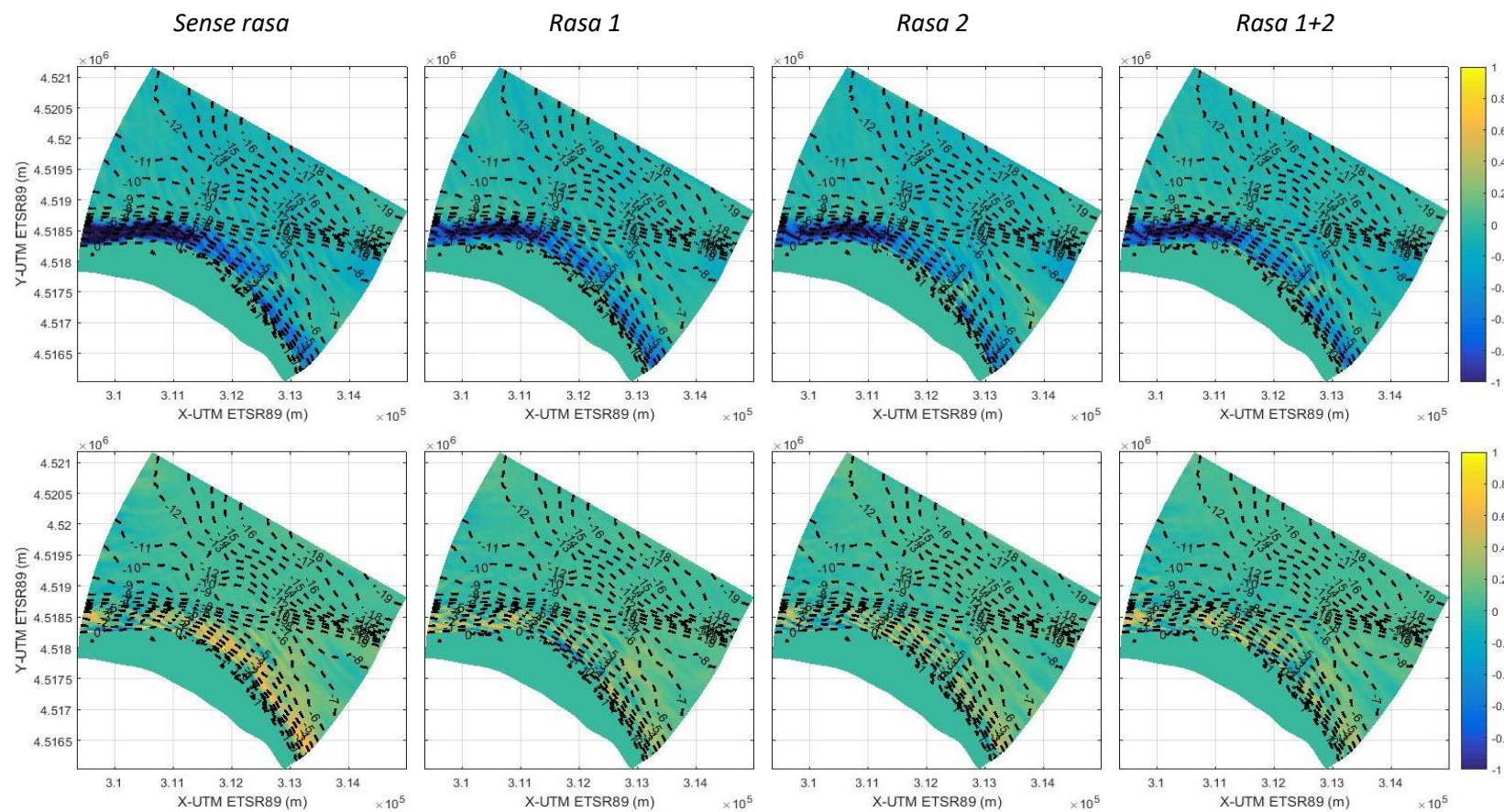


Figura 17. Variació espacial de la corrent longitudinal (a dalt) i transversal (a baix), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes del est nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.



## Tempesta de l'est (90°)

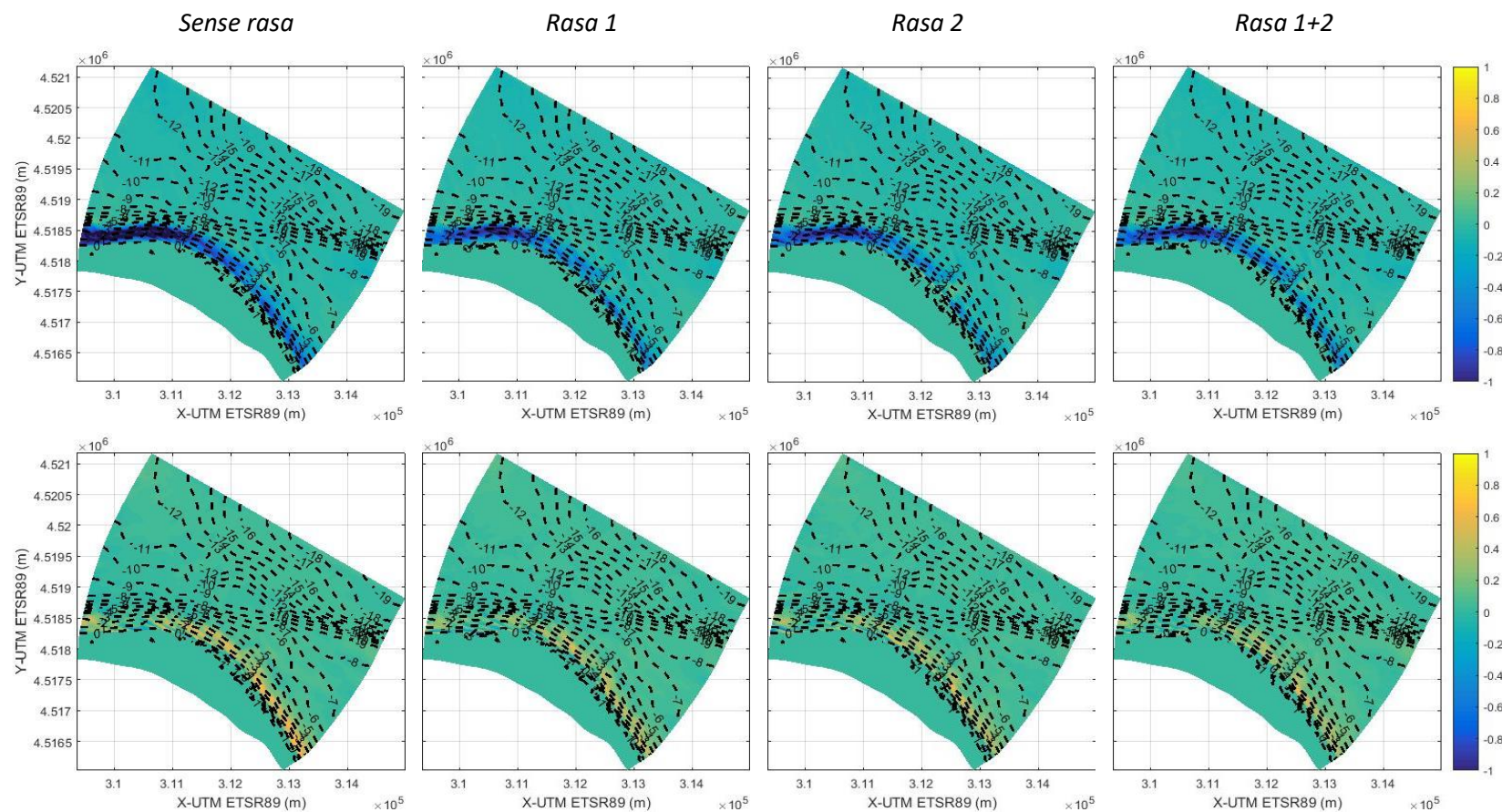


Figura 18. Variació espacial de la corrent longitudinal (a dalt) i transversal (a baix), al final de la simulació (t=6h), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

#### 5.2.1.1.3. Acumulació i erosió de sediments, (t=6h)

En aquest apartat es mostra un estudi del transport de sediments al final d'una tempesta de 6 h, per a les diferents alternatives, sectors direccionals i per a una probabilitat del 0.99.

En la , es pot observar com les tempestes provinents del nord-est casi no generen transport de sediment. En canvi, en les tempestes de l'est nord-est, les quals són més energètiques, s'hi pot observar més moviment de sediments (Figura 20). També s'hi pot veure com en la Rasa 1, el transport de sediments és menor que els altres casos.

La zona dels extrems de la línia de costa de la sageta és una zona d'acumulació de sediments, mentre que la zona central és una zona erosiva. Tot i que hi ha una major acumulació de sediments a la banda nord-oest de la sageta que en la banda nord-est, aquest comportament indica la existència d'un punt de divergència.

També s'observa com una vegada construïda la rasa hi ha menor acumulació i erosió de sediments que en el cas sense rasa. En la Rasa 1 és la que presenta majors canvis en el transport de sediments. Els majors canvis en els patrons d'erosió i sedimentació es poden observar en la zona oest del domini. La construcció d'aquesta rasa genera una baixada en l'erosió i en la sedimentació de 15 cm i 10 cm, respectivament. La Rasa 2, produeix una baixada en l'erosió i sedimentació de 10 cm i 5 cm, respectivament. La Rasa 1+2, quasi no presenta canvis en els patrons de sedimentació. La baixada generada per la Rasa 1+2 en l'erosió i sedimentació és de 5 cm i 2 cm, respectivament.

## Tempesta del nord-est (45°)

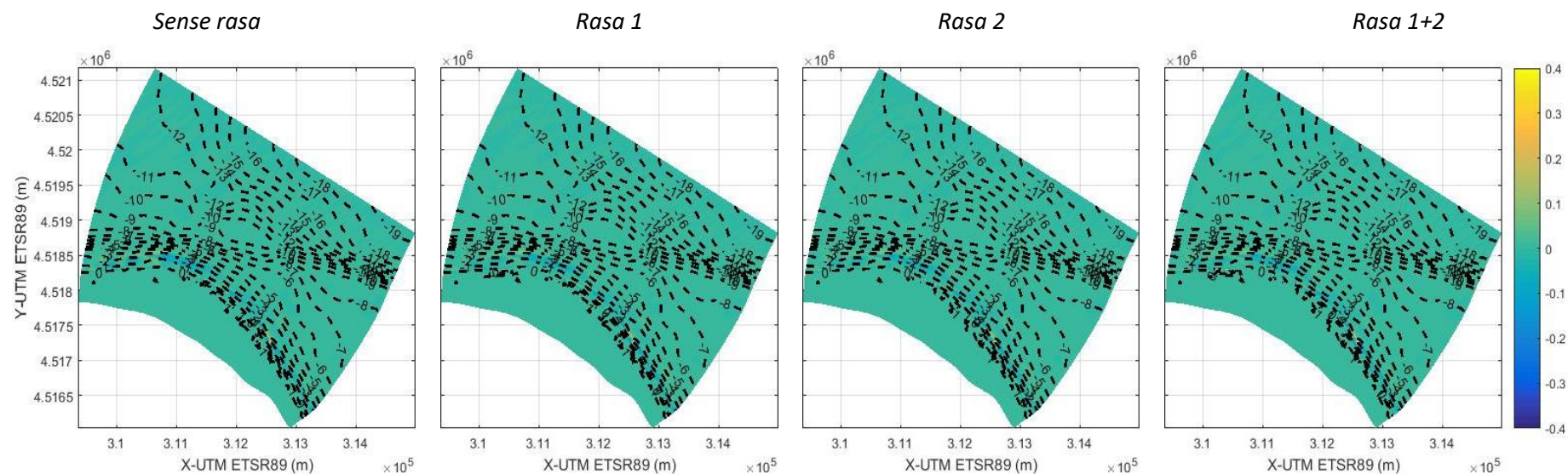


Figura 19. Variació espacial del transport de sediments, al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

## Tempesta de l'est nord-est (67,5°)

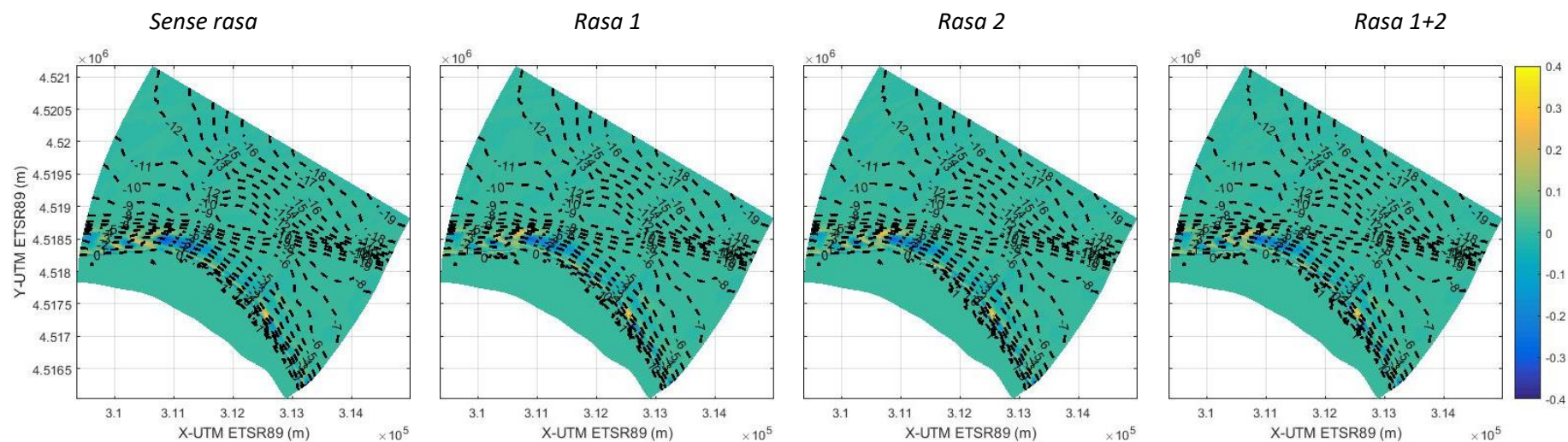


Figura 20. Variació espacial del transport de sediments, al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.



## Tempesta de l'est (90°)

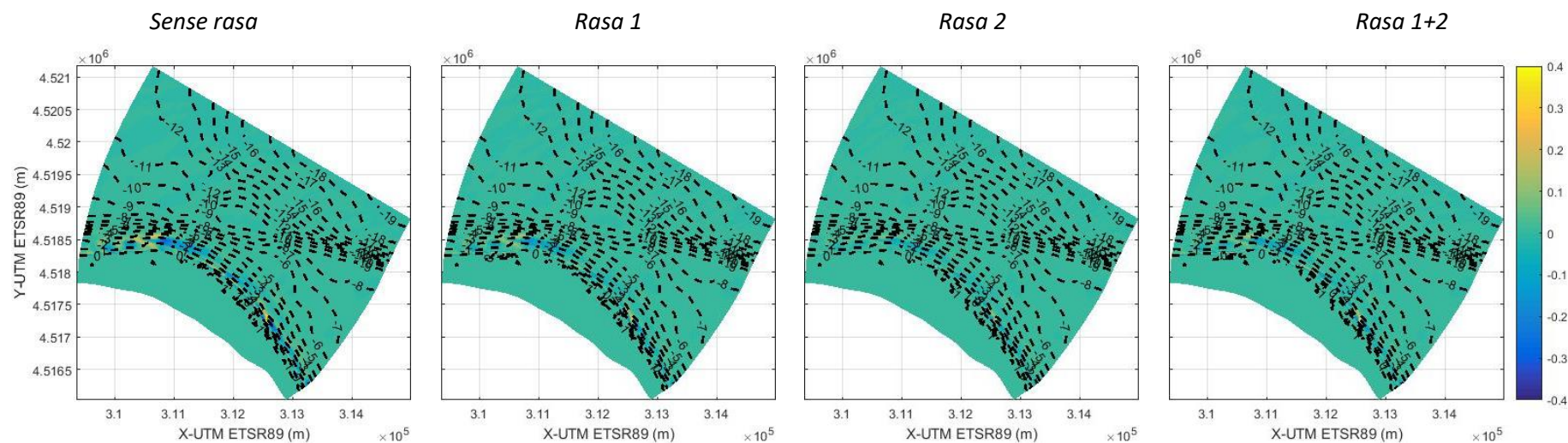


Figura 21. Variació espacial del transport de sediments, al final de la simulació (t=6h), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

#### 5.2.1.1.4. Varies seqüències de temporals

En aquest apartat s'ha simulat el patró de corrents transversals i longitudinals i el patró de transport de sediments per a tempestes de diferent durades. Com s'ha esmentat en l'apartat 5.2, la durada de les diferents tempestes és: 12h, 18h i 24h. Aquest anàlisi permet veure si conforme augmenta la duració de la tempesta, augmenten les diferències entre el cas sense rasa i amb rasa.

## Tempesta de 12h de durada

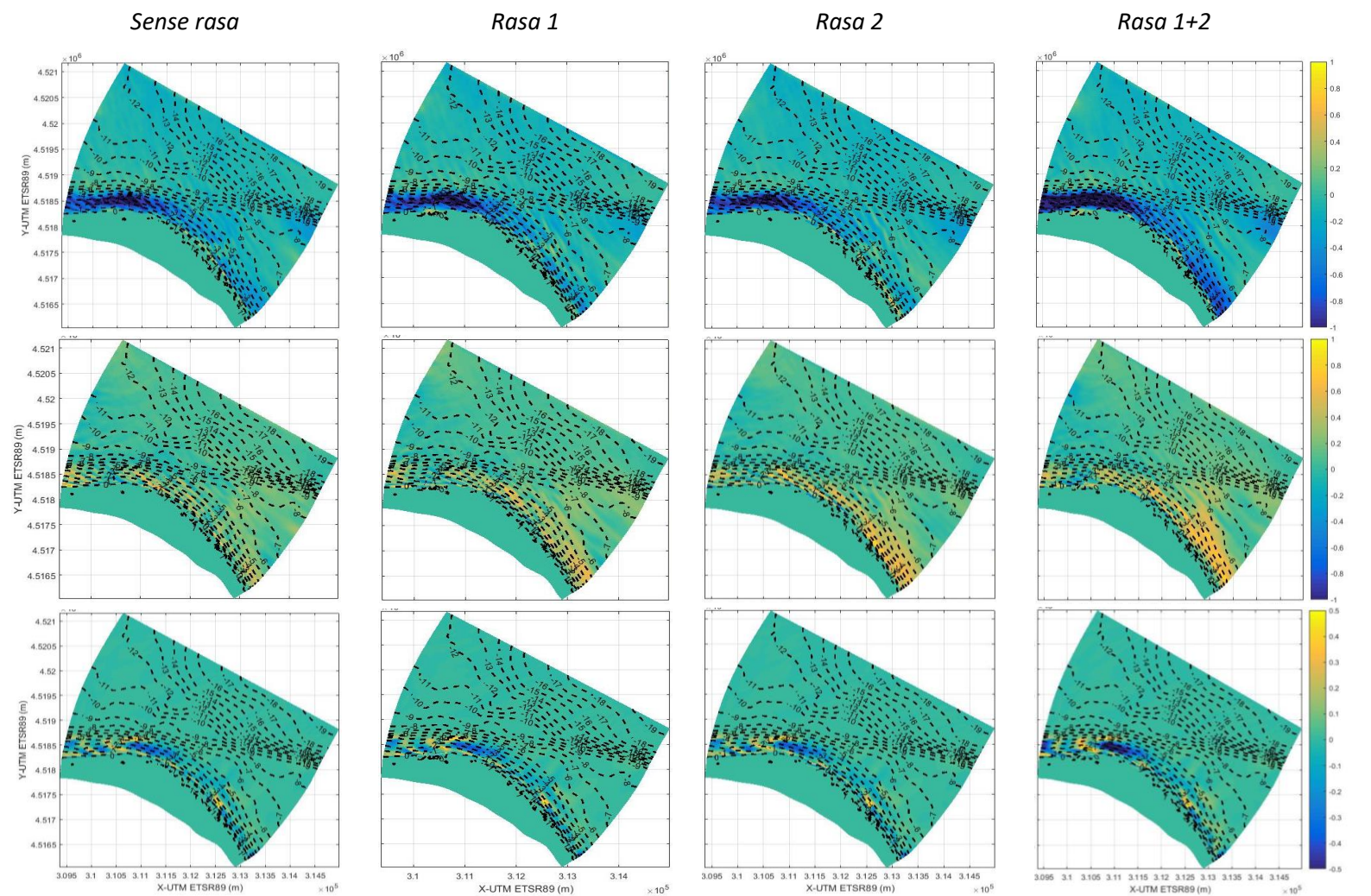


Figura 22. Variació espacial de la corrent longitudinal (fila de dalt) i transversal (segona fila), i del transport de sediments (última fila), al final de la simulació ( $t=12h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de les corrents longitudinals i transversals, del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.



## Tempesta de 18h de durada

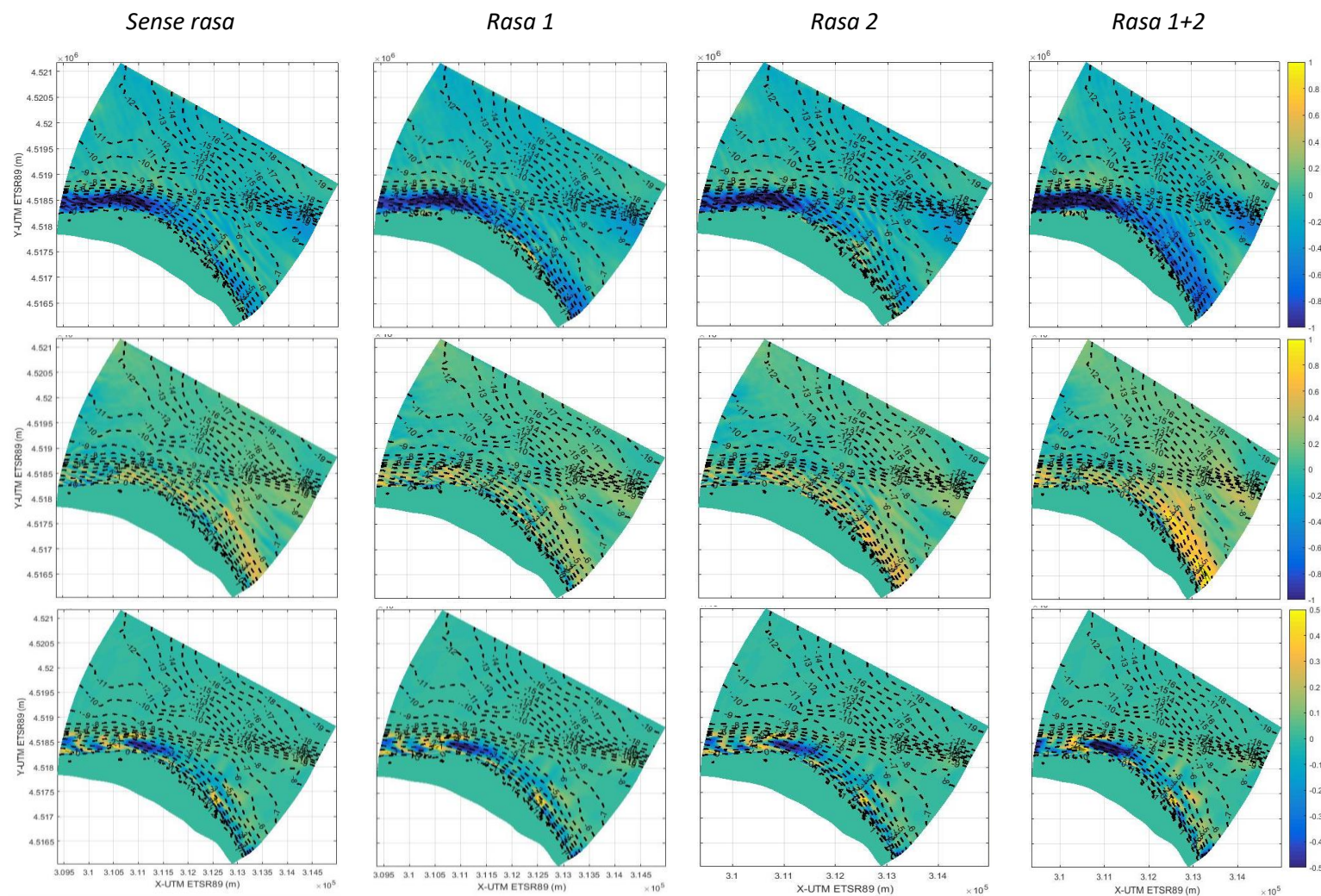


Figura 23. Variació espacial de la corrent longitudinal (fila de dalt) i transversal (segona fila), i del transport de sediments (última fila), al final de la simulació ( $t=18h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de les corrents longitudinals i transversals, del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.



## Tempesta de 24h de durada

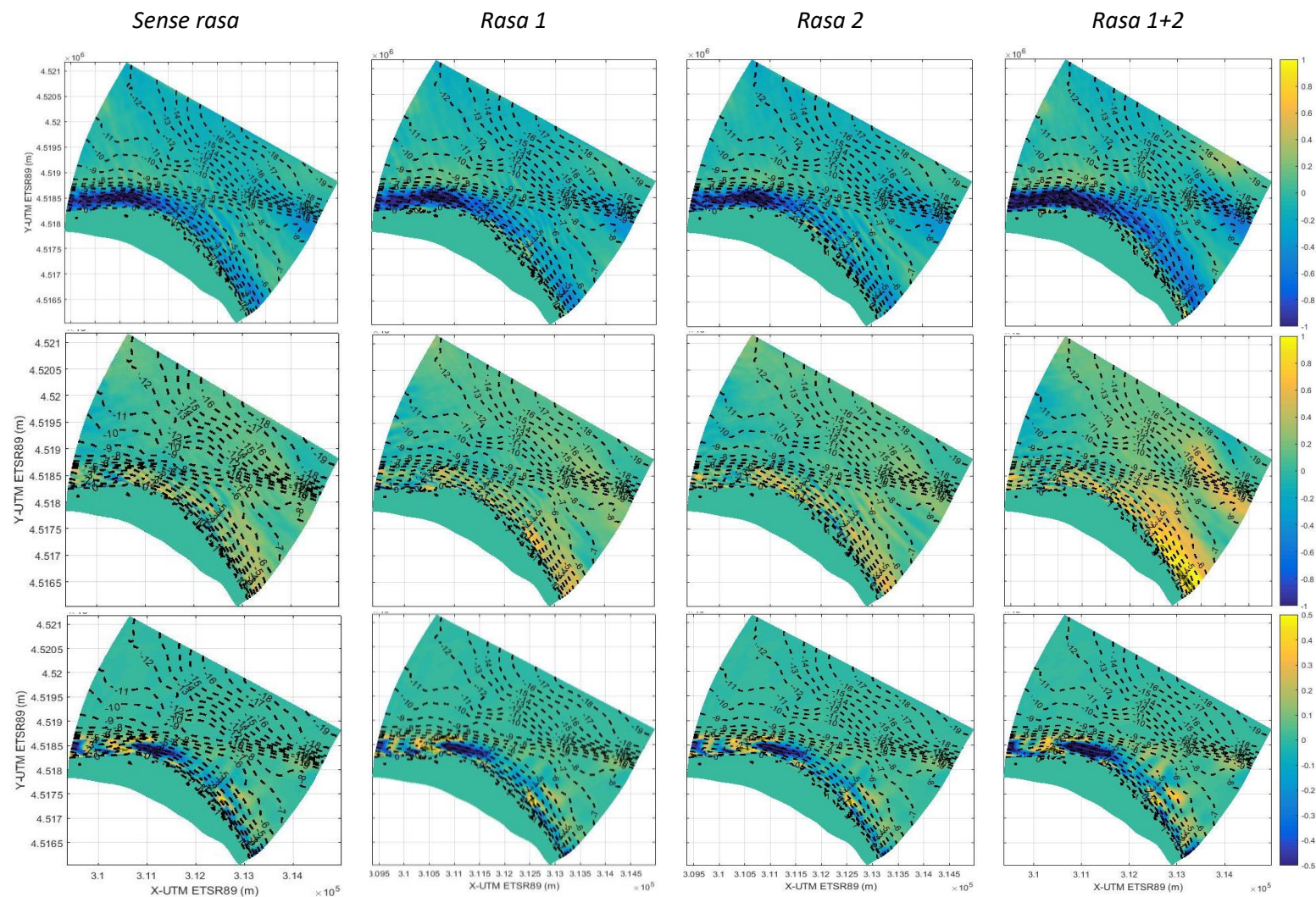


Figura 24. Variació espacial de la corrent longitudinal (fila de dalt) i transversal (segona fila), i del transport de sediments (última fila), al final de la simulació ( $t=12h$ ), durant els mesos de Desembre i Febrer, corresponents a tempestes de l'est nord-est amb una probabilitat del 0.99 per a la Punta del Fangar. La magnitud de les corrents longitudinals i transversals, del transport de sediments a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

#### 5.2.1.2. Període Juny-Agost

##### 5.2.1.2.1. Corrent longitudinal transversal, sense rasa (t=6h)

En les següents figures, es mostra el patró de les corrents longitudinals i transversals durant els mesos de Juny a Agost per als diferents sectors direccionals, per a una tempesta de 6 h de durada i les diferents probabilitats d'ocurrència.

Es pot observar com les corrents durant els mesos d'estiu són més suaus que en els mesos d'hivern, tot i així, presenten el mateix patró de corrents en ambdós períodes.

Les corrents longitudinals i transversals generades durant els mesos de Juny i Agost generen corrents molt fluïxes, la qual cosa farà que el sediment transportat per aquestes corrents serà mínim.

## Tempesta del nord-est (45°)

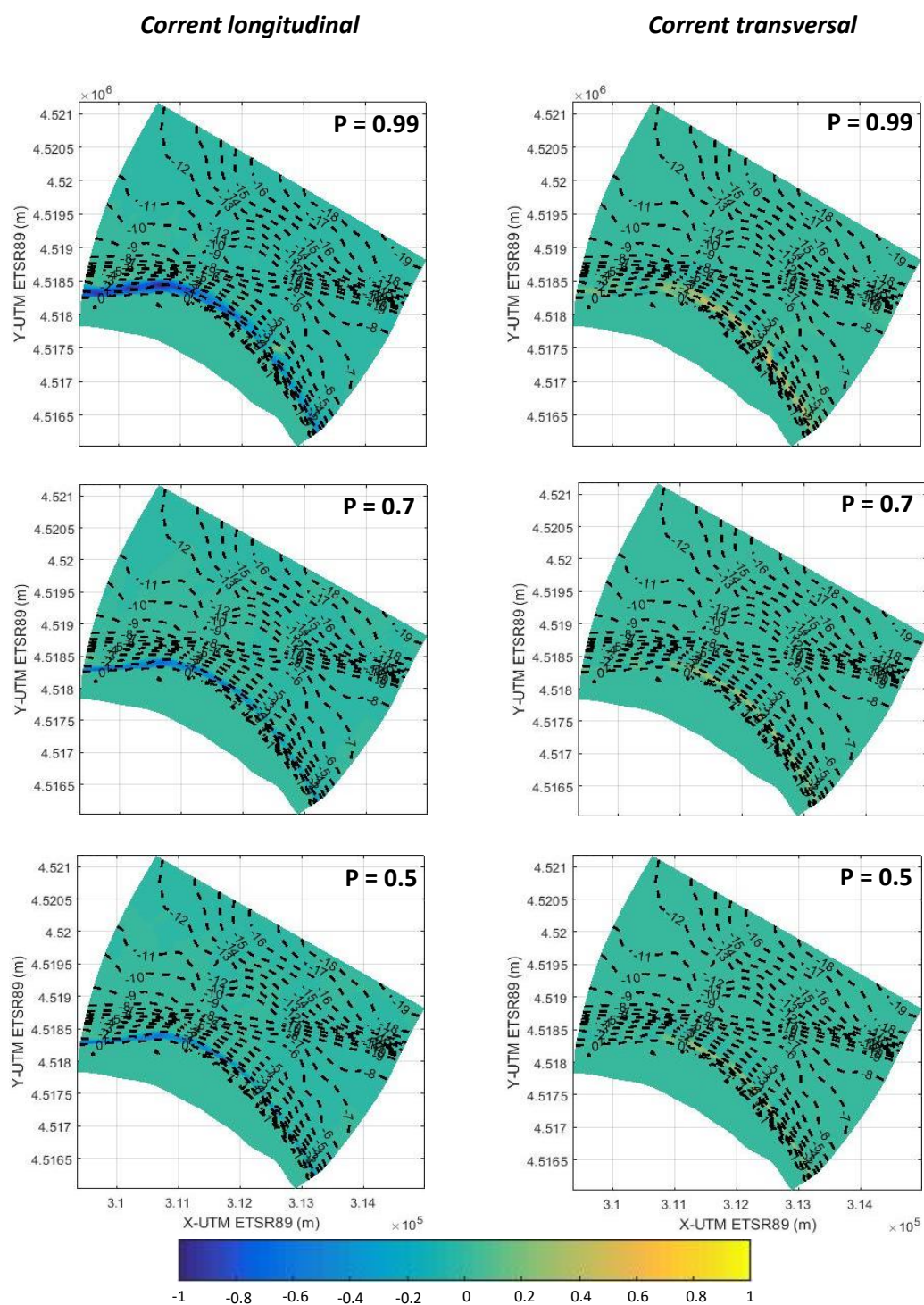


Figura 25. Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.



*Tempesta del est nord-est (67,5°)*

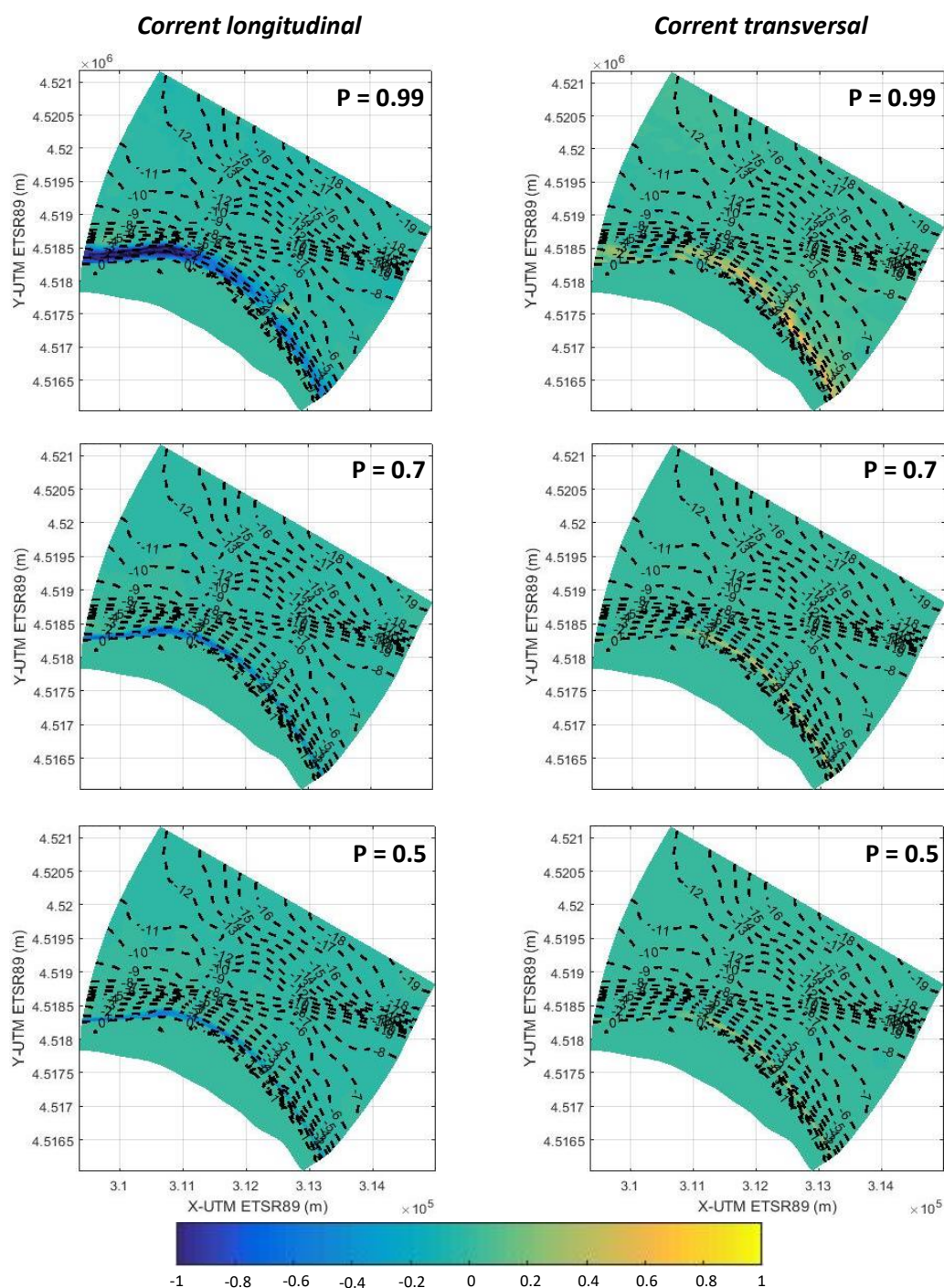
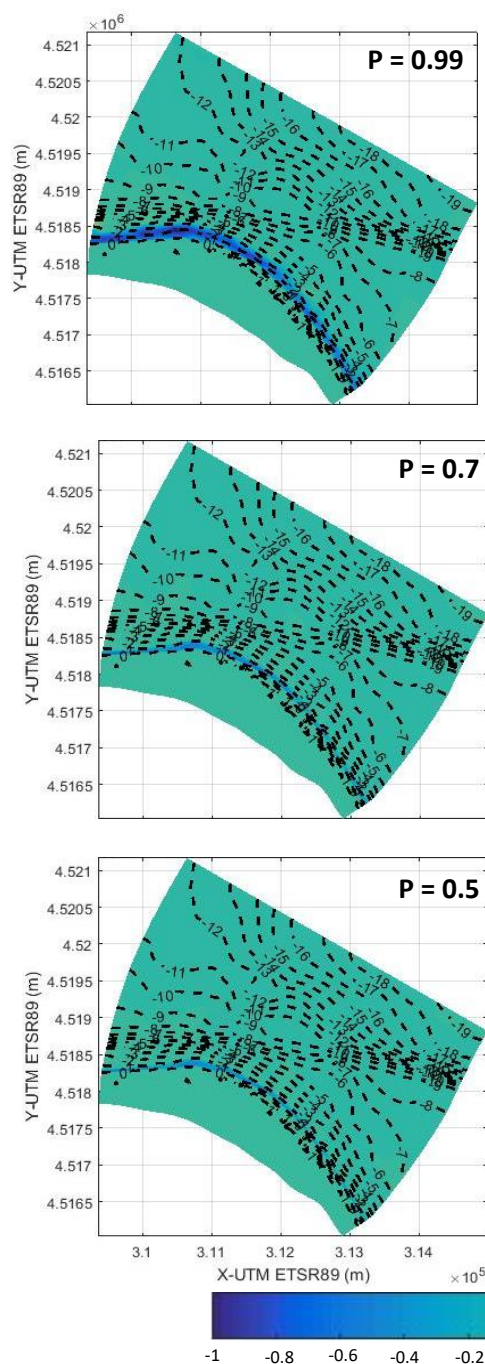


Figura 26. Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est nord-est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinues són línies batimètriques.

## Tempesta del est (90°)

### Corrent longitudinal



### Corrent transversal

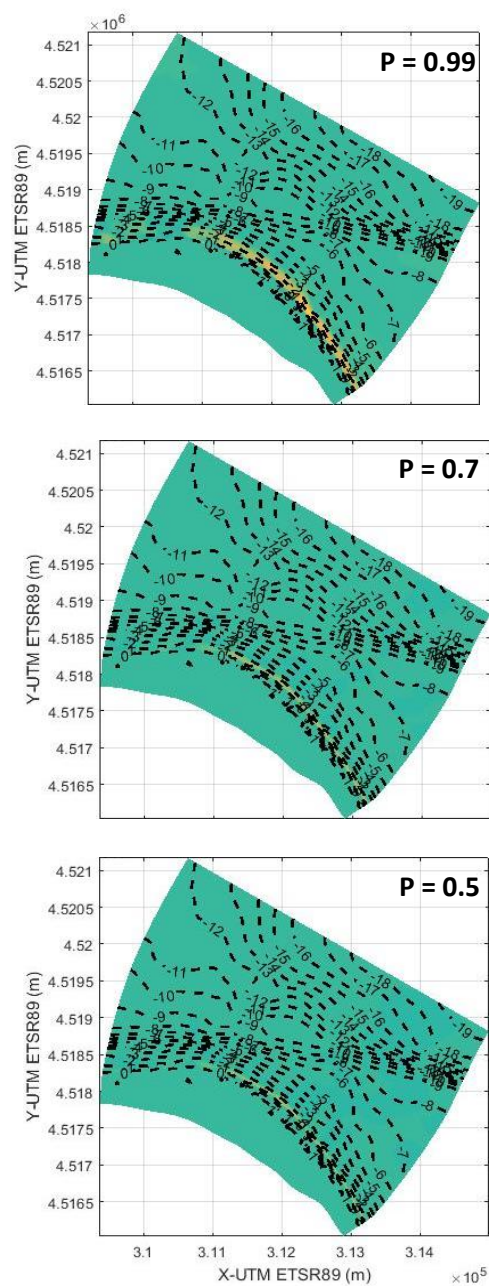


Figura 27. Variació espacial de la corrent longitudinal (esquerra) i transversal (dreta), al final de la simulació ( $t=6h$ ), durant els mesos de Juny i Agost, corresponents a tempestes del est amb probabilitats  $P=0.99$ ,  $0.7$  i  $0.5$  per a la Punta del Fangar. La magnitud de la corrent longitudinal i transversal a cada punt s'indica amb un gradient de color de fons. Les línies negres discontinües són línies batimètriques.

## 6. DISCUSSIÓ

Aquest treball és útil perquè permetrà dissenyar una estratègia d'extracció de sediments d'una àrea que té súper hàbit i transportar-la a altres àrees on hi ha dèficit. Per aquest bypass de sorra s'usarà la pròpia sorra del Delta del Ebre ja que és sempre més barat i més eco-compatible que portar material dragat d'altres jaciments propers al delta. Així doncs, utilitzant aquest estratègia, el cost de l'actuació i l'impacte mediambiental es podrien minimitzar al màxim.

Les hipòtesis de càlcul emprades i el mode de l'XBEACH emprat ha estat l'adequat. El model numèric utilitzat ha estat capaç de representar els patrons hidrodinàmics i morfodinàmics més comuns a l'àrea d'estudi, que a major durada d'un temporal menors són les corrents longitudinals i més transport de sediments es genera.

### 6.1. Anàlisi hidrodinàmic

Tant la resolució espacial del model SWAN com del model XBeach, és suficient per a reproduir els fenòmens físics més rellevants a la zona.

La refracció és un mecanisme que distribueix l'energia de l'onatge al llarg de la costa i per tant variar l'alçada d'ona. Aquest fenomen està condicionat per la direcció del camp d'onatge, la batimetria i l'alçada d'ona. Com més paral·lel a la costa és el camp d'onatge, menys refracció experimenta. D'altra banda, la refracció també es defineix com la variació de l'angle d'incidència del camp d'onatge. Aquesta variació de l'angle d'incidència es produeix quan l'onada nota la presència del llit marí, la qual cosa depèn de la relació  $h/L$ . Per tant, la refracció també està condicionada per la batimetria i l'alçada d'ona.

#### 6.1.1. Distribució de l'alçada d'ona ( $SL=0$ )

De la Figura 7 a la Figura 12, es pot veure la propagació de l'onatge des de mar obert cap a la línia de costa del Delta de l'Ebre.

Durant l'època de Desembre a Febrer, s'hi observa una alçada d'ona major que en els mesos de Juny a Agost. Això vol dir, que les tempestes són més enèrgiques durant els mesos d'hivern que d'estiu.

El sector direccional també juga un paper molt important en la propagació. El Delta de l'Ebre està orientat cap a l'est, per tant les tempestes provinents del nord-est són les que experimentaran més refracció i per tant una major pèrdua d'energia.

També cal observar que a la zona nord del Delta de l'Ebre, s'hi troben majors valors d'alçades a menys profunditat que al sud. Aquesta diferència entre el nord del Delta de l'Ebre i el sud, es deguda a que el propi Delta protegeix la zona sud de les tempestes provinents del nord-est, est nord-est i est.

A la zona del Fangar, les línies batimètriques són gairebé paral·leles a la línia de costa. Per això, per a una probabilitat de 0.99, aquest fet provoca que la variació de l'alçada d'ona no variï fins arribar a una profunditat de -40 metres. En canvi, per a les probabilitats de 0.7 i 0.5, no s'hi observen canvis significants en la distribució de l'alçada d'ona.

Al nord del delta les línies batimètriques estan més juntes que en la zona sud, això provoca que en la zona sud del delta hi hagi més dissipació d'energia que en la zona nord.

### 6.1.2. Distribució de la direcció d'ona (SL=0)

La distribució de la direcció d'ona és gairebé la mateixa per les diferents probabilitats.

A la zona sud, on la batimetria no és gairebé paral·lela a la línia de costa, presenta una gran refracció. Com es pot veure de la Figura 7 a la Figura 12, a la zona del Alfacs el canvi en la direcció d'ona és bastant pronunciat.

A la zona nord del Delta, al Fangar, casi no s'observa el fenomen de la refracció. Això es degut a que la batimetria és força paral·lela a la línia de costa i que les onades provenen de les direccions del nord-est, est nord-est i est.

En la Figura 8, les tempestes provinents de nord-est són les que produeix més refracció en la zona sud del Delta. En canvi, es pot veure com les tempestes provinents de l'est són les que produeix menys refracció (Figura 9).

## 6.2. Anàlisi morfodinàmic

### 6.2.1. Hidrodinàmica

En aquest apartat, s'analitzaran els resultats obtinguts amb el model XBeach, el comportament de les corrents generades per tempestes provinents de les direccions est, est nord-est i nord-est, i segons la probabilitat d'aquestes tempestes.

La corrent longitudinal ve marcada per la batimetria i les condicions d'onatge. De la Figura 13 a la Figura 15 i de la Figura 25 a la Figura 27, considerant unes condicions d'onatge provinents de l'est, est nord-est i del nord-est, es pot veure com les corrents viatgen de l'est cap a l'oest.

A la zona est es pot observar una major separació en les línies batimètriques que en la zona oest. Aquest fenomen provoca que les corrents longitudinals actuïn d'acord al principi de Bernoulli. El Principi de Bernoulli postula que, per a un fluid no viscos, si l'energia potencial augmenta, la velocitat disminueix. Per això, a la part oest del domini, on les línies batimètriques estan més juntes, la component longitudinal de les corrents adquireix més valor que en la part est, on les línies estan més separades. Aquest fet es pot traduir com que les corrents es mouen cap a un punt amb menor àrea, augmentant així la seva velocitat i per tant la magnitud de les corrents longitudinals.

D'altra banda, la corrent transversal depèn de l'onatge i la seva dissipació. De la Figura 13 a la Figura 15 i de la Figura 25 a la Figura 27, es pot veure com la corrent transversal és major a la zona est que en la zona oest, això es deu a la orientació de la Punta del Fangar i a la direcció de l'onatge. Per això no és d'estranyar que com més paral·lel a la costa i energètic sigui l'onatge, més corrent transversal generarà.

En la Punta del Fangar, l'onatge prové de l'est, est nord-est i de l'est. Per un cantó, l'onatge és força paral·lel a la línia de costa de la part est del domini, per a la qual cosa no hi ha una gran dissipació d'energia. Per l'altre, a la línia de costa de l'oest, l'onatge provinent d'aquestes direccions sofreix una gran dissipació d'energia degut a la refracció. Per tant, la zona oest



sofreix més refracció ja que no està orientada en la mateixa direcció que les onades provinents i per tant hi ha una major dissipació de l'energia.

Per a les diferents probabilitats es pot veure com els patrons són semblant però les magnituds de les corrents varien força. Per a una probabilitat del 0.99, les corrents es generen en calats d'entre 0 i 5 metres. Mentre que per a una probabilitat del 0.5, les corrents es produeixen en calats més baixos, d'entre 0 i 2 metres. Per tant, les corrents generades per a una probabilitat del 0.5, són corrents que no van més enllà de la zona de trencament de la platja.

Per a l'onatge provinent de l'est i del nord-est, les corrents longitudinals tenen una major component que les corrents transversals. En la Figura 13 i la Figura 15, es pot observar com la component transversal és quasi nul·la quan la component longitudinal és màxima. Això es pot deure a que les corrents longitudinals són tant fortes, que arrossegueu i anul·len les corrents transversals.

En canvi, per a l'onatge provinent de l'est nord-est, el mode de transport dominant és el transversal. Un dels factors d'aquest fenomen és que l'onatge provinent d'aquesta direcció és el més energètic i força paral·lel a la costa. Tot i així també es pot veure una component forta de les corrents longitudinals en la zona oest.

De la Figura 18, es pot observar com hi ha una clara disminució de les corrents, tant transversal com longitudinal, al construir-hi la rasa. Aquest fenomen es deu a que la rasa actua com a vas esmorteïdor del flux de massa d'aigua, reduint així la velocitat de les corrents. Aquesta disminució de la velocitat, es causada per dos fenòmens: dissipació de l'energia i increment del calat. L'onada provinent de mar de fons xoca amb la rasa, produint una turbulència que dissipa l'energia. D'altra banda, la reducció del calat implica un augment en l'energia potencial, la qual cosa provoca una disminució en l'energia cinètica, provocant una disminució de la velocitat de les corrents.

De la Figura 22 a la Figura 24, es poden observar les corrents longitudinals i transversals per a temporals de diferent durada. Tal i com s'ha mencionat en el apartat 5.2.1.1.4, a mesura que augmenta la durada de la tempesta, hi ha una disminució tant de les corrents longitudinals com transversals. Aquesta disminució es deu a que conforme augmenta la durada de la tempesta, el perfil de la platja tindrà tendència a un perfil d'equilibri "post-temporal". Això implica que la part submergida té un gradient batimètric que permet dissipar de forma més eficient l'acció conjunta del nivell del mar i les ones, produint una reducció en el mòdul de corrents.

### 6.2.2. Morfodinàmica

En l'anàlisi morfodinàmic es pot veure com hi ha una tendència a suavitzar el perfil perquè sigui més eficient en la dissipació. Per tant, els patrons morfodinàmics són els que s'haurien d'esperar ja que són de perfil dissipatiu. Els perfils dissipatius es caracteritzen per tenir una morfologia pràcticament bidimensional, és a dir, amb pendents suaus i una ampla zona de trencants que permet dissipar l'energia de les onades. De la Figura 19 a la Figura 21, es pot observar que les tempestes provinents de l'est nord-est, són les que presenten una major magnitud dels canvis morfològics, ja que són les tempestes més energètiques.



En l'acumulació o erosió de sediments s'observa com en els extrems de la línia de costa s'hi produeix acumulació mentre que a la zona central s'hi produeix erosió. Aquesta dinàmica denota l'existència d'un punt de divergència en el domini estudiat.

Les tempestes amb una probabilitat del 0.99 produeixen més moviment de sediments que les tempestes amb probabilitat del 0.5 i 0.7. En les tempestes amb aquesta probabilitat quasi no es produeix transport de sediments, això significa que la tensió de tall sobre el fons no és suficient per iniciar el transport de sediments.

Cal destacar la diferencia entre els diferents intervals escollits. Per al període de Desembre i Febrer es pot veure com les tempestes són més enèrgiques, produint així corrents més fortes i més transport de sediments. Per al Període entre Juny i Agost, es pot observar un menor transport de sediments ja que les tempestes a l'estiu són molt menys enèrgiques que les tempestes a l'hivern.

De la Figura 22 a la Figura 24, es mostra el transport de sediments per a temporals de diferent durada. Conforme augmenta la durada de la tempesta, es produeix més erosió, i per tant, hi ha més calat en la zona de trencament. Aquest augment del calat implica un augment de la pressió hidroestàtica, la qual cosa provoca una reducció de les corrents. Per tant, a més erosió, les corrents longitudinals són més baixes.

A continuació es resumeixen els resultats de les variables estudiades per a temporals de diferent durada.

	Sense rasa	Rasa 1	Rasa 2	Rasa 1+2
<b>Corrents longitudinals</b>	↓ 30 cm/s	↓ 10 cm/s	↓ 10 cm/s	↓ 5 cm/s
<b>Corrents transversals</b>	↓ 40 cm/s	↑ 5 cm/s	↑ 10 cm/s	↑ 15 cm/s
<b>Erosió de sediments</b>	↑ 10 cm	↑ 5 cm	↑ 10 cm	↑ 20 cm

Taula 3. Diferència del mòdul de corrents longitudinals i d'erosió de una tempesta de 12 h respecte una tempesta de 6h.

	Sense rasa	Rasa 1	Rasa 2	Rasa 1+2
<b>Corrents longitudinals</b>	↓ 50 cm/s	↓ 25 cm/s	↓ 15 cm/s	↓ 15 cm/s
<b>Corrents transversals</b>	↓ 35 cm/s	↑ 10 cm/s	↑ 15 cm/s	↑ 30 cm/s
<b>Erosió de sediments</b>	↑ 30 cm	↑ 20 cm	↑ 25 cm	↑ 30 cm

Taula 4. Diferència del mòdul de corrents longitudinals i d'erosió de una tempesta de 18 h respecte una tempesta de 6h.

	Sense rasa	Rasa 1	Rasa 2	Rasa 1+2
<b>Corrents longitudinals</b>	↓ 60 cm/s	↓ 35 cm/s	↓ 25 cm/s	↓ 20 cm/s
<b>Corrents transversals</b>	↓ 20 cm/s	↑ 20 cm/s	↑ 30 cm/s	↑ 45 cm/s
<b>Erosió de sediments</b>	↑ 40 cm	↑ 35 cm	↑ 40 cm	↑ 50 cm

*Taula 5. Diferència del mòdul de corrents longitudinals i d'erosió de una tempesta de 24 h respecte una tempesta de 6h.*

Com ja s'ha comentat anteriorment, hi ha una clara disminució de les corrents en els escenaris on s'hi ha construït una rasa. De la a la Figura 18, es pot observar que en l'escenari sense rasa, les màximes corrents longitudinals viatgen cap a l'oest. Aquest patró en les corrents mostra el desplaçament cap a l'oest de la Fletxa del Fangar, atès que a majors corrents longitudinals, la tensió al fons augmenta i hi ha més transport de sediments. Per tant, aquestes corrents longitudinals són les causants del tancament de la badia. Així doncs, es pot concloure que la rasa compleix amb la funció d'evitar aquest tancament, ja que redueix el transport de sediments cap a la Fletxa del Fangar.

De la Figura 19 a la Figura 27, s'observa una zona d'acumulació i erosió de sediments al llarg de la línia de costa en la zona oest del domini, la qual es pot explicar mitjançant un mecanisme típic de transport de sediments de llarga distància. Com s'ha esmentat anteriorment, la construcció de les rases produeix una menor erosió i sedimentació de la zona. Això es degut a la disminució de la corrent longitudinal, atès que una disminució d'aquestes produeix un menor transport de sediments.

Per tant, la construcció d'una rasa implica una disminució de les corrents longitudinals que transporten els sediments cap a la Punta del Fangar, i per tant, disminuir l'acumulació d'aquets, evitant que la badia es tanqui.

La construcció de la Rasa 1+2, la qual és una combinació de la Rasa 1 i la Rasa 2, crea un patró de corrents el qual no disminueix respecte l'escenari sense rasa, i per tant, una variació molt petita en el patró de sediments. D'altra banda, la Rasa 2, és la que presenta un canvi significatiu de la corrent longitudinal, però un petit canvi en el transport de sediments. Per últim, la Rasa 1 presenta una variació de les corrents longitudinals similar a la Rasa 2, però genera un major disminució en el transport de sediments.

Per tant, la Rasa 1 és la que presenta un major impacte en la zona per evitar que la gola es tanqui. D'altra banda, la Rasa 1 i la Rasa 1+2, no produeixen un gran impacte però l'avantatge d'aquestes dues rases permet guanyar volum de sorra per a zones amb dèficit.

En el cas de la Rasa 2, la qual esta situada davant del sistema dunar de defensa, es podria considerar augmentar la mida de la rasa. Així doncs, augmentar la mida d'aquesta rasa podria afectar al sistema dunar de defensa, la qual cosa implica eliminar una de les defenses naturals per a l'estabilitat de la Punta del Fangar.

A continuació es resumeixen els resultats de les variables estudiades per a les diferents propostes.

	Rasa 1	Rasa 2	Rasa 1+2
<b>Corrents longitudinals</b>	↓ ↓ 50 cm/s	↓ ↓ ↓ 70 cm/s	↓ 20 cm/s
<b>Corrents transversals</b>	↓ ↓ ↓ 60 cm/s	↓ ↓ 40 cm/s	↓ 20 cm/s
<b>Erosió de sediments</b>	↓ ↓ ↓ 15 cm	↓ ↓ 10 cm	↓ 5 cm
<b>Acumulació de sediments</b>	↓ ↓ ↓ 10 cm	↓ ↓ 5 cm	↓ 2 cm

*Taula 6. Resum dels resultats principals*

## 7. CONCLUSIONS

L'objectiu del treball ha estat l'anàlisi de la influència local d'un sistema de rases en la Punta del Fangar per evitar el tancament de la badia. Aquest estudi s'ha realitzat mitjançant modelat numèric. La hidrodinàmica ha estat avaluada amb el clima mig de l'onatge a la zona, combinat amb alts nivell del mar. L'onatge ha estat propagat des d'aigües profundes fins a aigües someres amb SWAN. Aquestes condicions d'ones i nivell del mar han estat els agents impulsors d'un model morfodinàmic (XBEACH), per avaluar l'impacte d'aquest sistema de rases.

Els patrons hidrodinàmics i morfodinàmics de la zona estudiada, representats amb el model SWAN i XBeach, són suficients per a la reproducció dels fenòmens físics més rellevants a la zona.

Durant els mesos de Desembre a Febrer, les tempestes són més energètiques que durant l'època d'estiu i generen un major canvi tant hidrodinàmic com morfològic. Aquestes tempestes presenten un patró de circulació de les corrents més fort que durant les tempestes d'estiu, i per tant, un major canvi en el patró de transport de sediments. Per a les tempestes procedents de l'est nord-est, durant els mesos d'hivern i amb una probabilitat del 0.99, es generen les corrents més fortes, amb valors d'entre 125 cm/s i 160 cm/s, i es produeix un major canvi morfològic, amb una erosió de 25 cm i una acumulació de sediments de 30 cm.

Per a una major durades de tempestes, s'obtenen també s'obtenen els patrons hidrodinàmics més forts i un gran augment en el transport de sediments. Per tant, i tal i com es mostra en les Taula 3, Taula 4 i Taula 5, a major durada de una tempesta, aquesta presenta una disminució de les corrents longitudinals i un augment en el transport de sediments.

En l'escenari inicial sense rasa, els resultats obtinguts amb el model SWAN i XBeach, mostren com el patró de circulació de les corrents longitudinals és cap a l'Oest, transportant els sediments cap a la gola, provocant el tancament de la badia.

La Rasa 1, presenta una disminució del 30% en les corrents longitudinals i és l'escenari en el qual s'aconsegueix una major disminució de la sedimentació i erosió de sediments.

La construcció de la Rasa 2, provoca un major canvi en les corrents longitudinals respecte la Rasa 1, però no disminueix de forma significant el transport de sediments cap a la Badia.

La Rasa 1+2, és la rasa que genera un menor canvi en la zona d'estudi tant en el patró de corrents com de transport de sediments.

Com ja s'ha dit anteriorment, l'objectiu d'aquesta tesina és evitar el tancament de la badia. Per tant, la Rasa 1 i la Rasa 2 són les que presenten uns resultats més òptims per evitar aquest tancament, ja que són els escenaris que presenten una reducció significant tant de les corrents que viatgen cap a l'Oest com del transport de sediments. Tot i així, la Rasa 1 presenta uns millors resultats, atès que genera una major disminució en el transport de sediments cap a la badia.

## 8. BIBLIOGRÀFIA

- Albarado-Aguilar, D., Jiménez, J. A., & Nicholls, R. J. (2012). Flood hazard and damage assessment in the Ebro Delta (NW Mediterranean) to relative sea level rise. *Natural Hazards*, 62: 1301 – 1321.
- Basile, P., (2003). Geomorfología e Hidráulica Fluvial. Movimiento Incipiente de Sedimentos. *Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales*.
- Battjes, J. A. (1994). Shallow water wave modelling. Vancouver, University of British Columbia: Proc. Int. Symp.: *Wave – Physical and Numerical Modelling*, eds. M. Isaacson and M. Quick.
- Bhattacharya, J. P., & Giosan, L., (2003). Wave-influenced deltas: Geomorphological implications for facies reconstruction. *Sedimentology*, 50(1): 187-210.
- Bolaños, R., Jorda, G., Cateura, J., Lopez, J., Puigdefabregas, J., Gomez, J., & Espino, M. (2009). The XIOM: 20 years of a regional coastal observatory in the Spanish Catalan coast. *Journal of Marine Systems*, 77: 237-260.
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuljen, L. H., (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104 (c4): 7649-7666.
- Cateura, J., Sánchez-Arcilla, A., & Bolaños, R. (2004). Clima de viento en el Delta del Ebro. Relación con el estado del mar. *Laboratori d'Enginieria Maritima, Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Cacchione, D. A., Drake, D. E., Losada, M. A., & Medina, R. (1990). Bottom-boundary layer measurements on the continental shelf off the Ebro River, Spain. *Marine Geology*, 95: 179-192.
- Departament de Territori i Sostenibilitat (2018). *Parcs de Catalunya. Parc Natural del Delta de l'Ebre. Hidrologia y Geología. La formación del delta: la lucha secular entre el río y el mar*. Recuperat el 7 de Febrer, 2018, de: [http://parcsnaturals.gencat.cat/es/delta-ebre/coneix-nos/patrimoni\\_natural\\_i\\_cultural/hidrologia\\_i\\_geologia/](http://parcsnaturals.gencat.cat/es/delta-ebre/coneix-nos/patrimoni_natural_i_cultural/hidrologia_i_geologia/)
- Flamant, C. V., Pelon, J., Hauser, D., Quentin, C., Drennan, W., Gohin, F., Chapron, B., & Gourrion, J. (2003). Analysis of surface wind and roughness length evolution with fetch using a combination of airborne lidar and radar measurements. *Journal of Geophysical Research*, 108 (C3): 26.
- García, M. A., Sánchez-Arcilla, A., Sierra, J. P., Sospedra, J., & Gómez, J. (1993). Wind Waves Off the Ebro Delta, NW Mediterranean. *Journal of Marine System*, vol. 4. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam: 235-262.
- García-León, M. (2016). Numerical and Physical Models. *Barcelona: LIM-UPC (Maritime and Port Engineering Lecture Slides)*.
- Genua-Olmedo, A., Alcaraz, C., & Ibáñez, C. (2016). Sea level rise impacts on rice production: The Ebro Delta as an example. *Science of the Total Environment*, 571: 1200-1210.

- Gracia, V., (2005). Dinámica sedimentaria en la plataforma interna del Delta del Ebre. *Barcelona: Ph. Thesis Polytechnic University of Catalonia.*
- Grases, A. (2017). Flooding and erosion assessment at Riumar (Ebro Delta). *Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.*
- Guillén, J., & Jiménez, J. A. (1995) Processes behind the longshore variation of the sediment grain size in the Ebro delta coast. *J. Coastal Res. 11 (1): 205-218.*
- Holthuijsen, L. H., (2007). Waves in oceanic and coastal waters (1<sup>st</sup> Edition). *Cambridge University Press.*
- Hoonhout, B., (2015). XBeach user manual. *Recuperat el 21 de Setembre, 2018, de [https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user\\_manual.html](https://xbeach.readthedocs.io/en/latest/user_manual.html)*
- Jiménez, J. A. (1996). Evolución Costera en el Delta del Ebro. Un proceso a diferentes escalas de tiempo y espacio. *PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 274 pp.*
- Jiménez, J. A., & Sánchez-Arcilla, A. (1993). Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain. *Marine Geology, 144: 105-118.*
- Jiménez, J. A., Sánchez-Arcilla, A., Valdemoro, H. I., Garcia, V., & Nieto, F. (1997) Processes reshaping the Ebro delta. *Marine Geology, 144: 59-79.*
- Martínez, A., (2018). Comportament recent de la Punta del Fangar (Delta de l'Ebre). *Final Project, Universitat Politècnica de Catalunya.*
- Masselink, G., & Hughes, M. G., (2003). Introduction to coastal processes and geomorphology. *London: Routledge.*
- Mösso, C. (2004). Estudio Numérico-Experimental de la Dinámica de la Zona Cercana a la Costa. *Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.*
- Prinos, P. (2016). Coastal wiki. *Recuperat el 21 de setembre, 2018, de [http://www.coastalwiki.org/wiki/Modelling\\_coastal\\_hydrodynamics](http://www.coastalwiki.org/wiki/Modelling_coastal_hydrodynamics)*
- Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. (2015). Puertos del Estado. *Oceanografía. Datos Históricos. Recuperat el 8 de noviembre, 2017, de <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>*
- Ràfols, L., Grifoll, M., Jordà, G., Espino, M., Sairouni, A., & Bravo, M. (2017). Shelf circulation induced by an orographic wind jet. *Journal of Geophysical Research: Oceans, 122: 8225-8245.*
- Rodríguez, I. (2004). Ebro Delta (Spain). *Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos.*
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R., (2010). Xbeach Model Description and Manual. *Delft: Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.*
- Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., & Garcia, V. (2014). Hydro-morphodynamic modelling in Mediterranean stroms – errors and uncertainties under Sharp gradients. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 14: 2993-3004.*

- Sánchez-Arcilla, A., García-León, M., García, V., Devoy, R., Stanica, A., & Gault, J. (2016). Managing coastal environments under climate change: Pathways to adaptation. *Science of the Total Environment*, 572: 1336-1352.
- Sánchez-Arcilla, A., Jiménez, J. A., Gelonch, G., & Nieto, J., (1997). El problema erosivo en el Delta del Ebro. *Revista de obras públicas*, 3368: 23-32.
- Taller d'Enginyeria Ambiental. (2008). Framework studies for preventing and adapting to climate change in Catalonia. Estudi N1: Ebro Delta. *Generalitat de Catalunya: The Catalan Office for Climate Change, Department of the Environmental and Housing*.
- The SWAN team. (2016). SWAN Scientific and Technical Documentation. *SWAN Cycle III version 41.10 A. Delft: Delft University of Technology*.
- Van Rijn, L. C. (2007). Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133.
- Wright, L. D., & Short, A. D., (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, 56: 93 – 118.